



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

MIKA LINDBLAD

SÄÄDETTÄVÄT AKTIIVISET KUORMAT

Diplomityö

Tarkastajat :

tutkijatohtori Harri Raittinen

professori Karri Palovuori

Tarkastaja ja aihe hyväksytty

Tieto- ja sähkötekniikan tiede-  
kuntaneuvoston kokouksessa

3.2.2010

# TIIVISTELMÄ

## TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Signaalinkäsittelyn ja tietoliikennetekniikan koulutusohjelma

MIKA LINDBLAD: Säädetävät aktiiviset kuormat

Diplomityö, 79 sivua, 31 liitesivua

Toukokuu 2010

Pääaine: Elektroniikka, elektroniikan laitesuunnittelu

Tarkastajat: Harri Raittinen, Karri Palovuori

Avainsanat: aktiivinen kuorma, säädetty kuorma, elektroninen kuorma

Työ on kaksiosainen, ensimmäisessä osassa tarkastellaan aktiivisia kuormia teoriassa. Aiheen käsittely aloitetaan passiivisen ja aktiivisen kuorman määrittelyllä, sekä aktiivisen kuorman toimintamuotojen esittelyllä. Teoriaa viedään pidemmälle tutkimalla yksinkertaistettujen kytkentöjen toimintaa ja aktiivisen kuorman keskeisiä ominaisuuksia. Lisäksi tutustutaan joihinkin saatavilla oleviin aktiivisiin kuormiin ja niiden käyttösovelluksiin.

Työn jälkimmäisessä osassa keskitytään enemmän käytäntöön aktiivisen kuorman suunnittelun ja toteutuksen kautta. Suunnitteluprosessi käydään läpi vaiheittain toiminnallisiin lohkoihin jaettuna. Samalla tuodaan esille suunnittelun ja toteutuksen aikana tehtyjä havaintoja. Lopuksi tarkastellaan toteutettua aktiivista kuormaa ja arvioidaan suunnittelun ja toteutuksen onnistuminen.

Toteutettu aktiivisen kuorman jännitealue on 0-60V ja virta-alue 0-60A. Suurimaksi jatkuvaksi tehoksi on määritelty 300W, hetkellisesti enemmän. Laite toimii vakiovirta- ja vakioresistanssimuodoissa, lisäksi dynaaminen toimintatila mahdollistaa pulssimaisen virran käytön. Dynaamisessa toimintatilassa myös jaksonaika, pulssisuhde ja virran nousunopeus ovat säädetävissä.

## ABSTRACT

### TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Signal Processing and Communications Engineering

MIKA LINDBLAD: Adjustable active loads

Master of Science Thesis, 79 pages, 31 Appendix pages

May 2010

Major: Electronics

Examiner: Harri Raittinen, Karri Palovuori

Keywords: active load, adjustable load, electronic load

This work is divided into two parts. First part attends to theory of active loads. It begins with definition of passive and active loads, and continues by simplified schematics and circuits. Theory is taken even further by introducing few commercially available electronic loads and their applications.

Second part is about designing and implementing an active load. Design process is covered thoroughly and divided into functional blocks. Discoveries made during the process are unveiled. At the end, implemented active load gets measured and evaluated.

Implemented active load has voltage rating of 0-60V and current rating 0-60A. Maximum power dissipation has been specified as 300W, momentarily even more. The device operates in constant current and constant resistance modes. It also has dynamic operating mode for pulsed current. In dynamic mode period, duty cycle and slew rate are adjustable.

## Alkusanat

Tämä työ on tehty Tampereen teknillisen yliopiston opinnäytetyönä. Työn aihe on valittu itse, sen pohjana on henkilökohtainen kiinnostus elektroniikkaan ja elektroniikan testaukseen. Työ on suoritettu omarahoitteisesti, eikä se ole sidoksissa muihin tahoihin. Valitusta aiheesta johtuen työn näkökulma tulee painottumaan elektroniikan testaukseen.



# Sisällys

1.Johdanto.....	7
2.Säädettävät aktiiviset kuormat teoriassa.....	8
2.1 Kuorman määrittely.....	8
2.2 Säädettävän aktiivisen kuorman määrittely.....	11
2.3 Kuormien nimitykset.....	11
2.4 Aktiivisen kuorman rakenne.....	12
2.5 Aktiivisen kuorman toimintamuodot.....	13
2.6 Aktiivisen kuorman toiminta aikatasossa.....	16
2.7 Aktiivisen kuorman keskeiset ominaisuudet.....	18
2.8 Aktiiviset kuormat ja teholähteet.....	20
3.Käytännön sovelluksia.....	26
3.1 Teholähteiden testaus.....	26
3.2 Aurinkopaneelien testaus .....	29
3.3 Akkujen testaus.....	30
3.4 Puolijohdekomponenttien testaus.....	32
4.Kaupallisia laitteita.....	34
4.1 Chroma ATE : 63101A.....	34
4.2 Agilent : N3302A.....	35
4.3 BK Precision : 8540 .....	36
4.4 TTI : LD300.....	37
5.Säädettävän kuorman suunnittelu ja toteutus.....	39
5.1 Yleistä suunnittelusta ja toteutuksesta.....	39
5.2 Alustava määrittely.....	40
5.3 Suunnittelu järjestelmätasolla.....	43
5.4 Lohkojen suunnittelu ja toteutus.....	45
5.4.1 Teholohko.....	45
5.4.2 Mittaus- ja ohjauslohko.....	51
5.4.3 Teholähdelohko .....	55
5.4.4 Käyttöliittymälohko.....	57
5.4.5 Jäähdytyslohko.....	59
5.5 Piirilevy.....	59
5.6 Mekaaninen rakenne.....	63
5.7 Ohjelma.....	65

6.Säädettävän kuorman arviointi.....	68
6.1 Mittaukset.....	68
6.2 Yhteenveto.....	82
Lähteet.....	84
Liite I, Piirikaavio.....	85
Liite II, Piirilevy.....	94
Liite III, Osalista.....	99
Liite IV, Valokuvat.....	101

# 1. Johdanto

Säädettävän aktiivisen kuorman tarkastelu aloitetaan kuorman käsitteen määrittelyllä. Kuorman käsitteessä edetään passiivisesta kuormasta aiheen mukaisesti aktiiviseen, jonka ominaisuuksia käsitellään teoreettiselta kannalta. Tarkastelua täydennetään viemällä se myös käytännön kytkentöjen tasolle ja muodostamalla aktiivisesta kuormasta elektronikan kytkennöissä käytettävä toiminnallinen kokonaisuus. Lisäksi verrataan aktiivista kuormaan teholähteisiin ja huomataan niiden täydentävän toisiaan.

Teoriaosuuden jälkeen esitellään aktiivisten kuormien käyttömahdollisuuksia ja sovelluksia, joista huomataan aktiivisen kuorman olevan laajalti käyttökelpoinen. Lisäksi käydään läpi lyhyesti joidenkin kaupallisten laitteiden ominaisuuksia, jotta voidaan muodostaa kokonaiskuva tarjolla olevista laitteista ja sovelluksista.

Työn käytännön osuudessa suunnitellaan ja toteutetaan säädettävä aktiivinen kuorma. Suunniteltava ja toteutettava aktiivinen kuorma on tehty ensisijaisesti tehrolähteiden testaukseen. Sillä voidaan kuormittaa tehrolähteitä vaihtelevasti ja tutkia erityisesti niiden transienttikäyttäytymistä. Toteutettu aktiivinen kuorma soveltuu tietysti muuhunkin, sillä se on moneen mukautuva elektronikan yleistyökalu.

Työ on tehty elektroniikkaan tunnetun henkilökohtaisen kiinnostuksen vuoksi. Työhön ei ole saatu taloudellista tukea miltään taholta, vaan se on suoritettu omarahoitteisesti. Työ ei tämän vuoksi esitä vastauksia suoranaisesti kenenkään muun kuin tekijänsä kysymyksiin. Aihe on kuitenkin yleishyödyllinen ja laajalti sovellettavissa. Tarkastelunäkökohta tulee jo työn käytännön osuudestakin johtuen painottumaan elektronikan testaukseen.

## 2. Säädettävät aktiiviset kuormat teoriassa

### 2.1 Kuorman määrittely

Kuorma on perinteisesti mielletty passiiviseksi elementiksi joka kuluttaa tehoa. Tämän kaltaista kuormaa voidaankin hyvin kuvata resistanssilla. Se kykenee ainoastaan kuluttamaan tehoa joka on verrannollinen kuorman ylitse olevaan jännitteeseen ja sisäiseen resistanssiin. Tällaisen kuorman jännite, virta ja resistanssi ovat sidottuja toisiinsa Ohmin lailla kaavan 1 mukaisesti. Kuorman kuluttama teho voidaan laskea kun tiedetään kaksi kolmesta edellä mainitusta kuormaan liittyvästä parametrilla. Kaavassa 2 on esitetty kuorman tehon laskenta eri parametrien avulla. Kaavoissa muuttuvat parametrit on esitetty funktioina ajan suhteen.

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} \quad (\text{Kaava 1})$$

$$p(t) = u(t)i(t) = \frac{u(t)^2}{R} = i(t)^2 R \quad (\text{Kaava 2})$$

Passiivinen kuorma voi olla paitsi resitiivinen, myös induktiivinen tai kapasitiivinen. Erotuksena resitiiviseen kuormaan, induktiivinen tai kapasitiivinen kuorma varastoi tehoa. Induktiivisen kuorman tapauksessa virta on aikatasossa jännitettä jäljessä. Kuorman virtaa voidaan kuvata kaavalla 3 ja tehoa kaavalla 4.

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u d\tau + i(0) \quad (\text{Kaava 3})$$

$$p(t) = u(t)i(t) = Li(t)\frac{di}{dt} \quad (\text{Kaava 4})$$

Kapasitiivisella kuormalla virta on aikatasossa jännitettä edellä. Kapasitiivisen kuorman jännitteelle pätee kaava 5 ja teholle kaava 6.

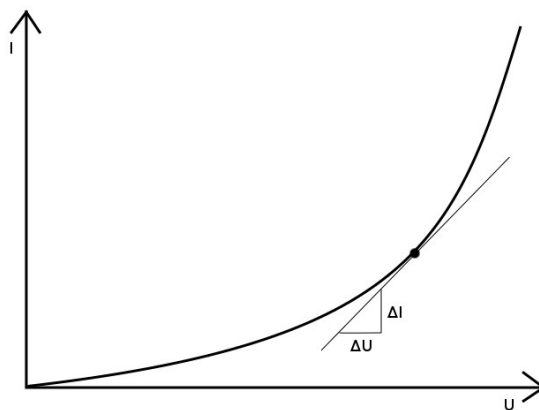
$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i \, dt + v(0) \quad (\text{Kaava 5})$$

$$p(t) = u(t)i(t) = Cu(t) \frac{di}{dt} \quad (\text{Kaava 6})$$

Passiivinen kuorma voi olla myös olla paitsi puhtaasti resistiivinen, induktiivinen tai kapasitiivinen, myös eri elementtien rinnan- ja sarjankytkentä. Tarkasteltaessa kuormaa minä tahansa valittuna ajan hetkenä, sen ylitse vaikuttaa jännite ja sen läpi kulkee virtaa. Kuormalle voidaan määritellä resistanssi kyseisellä ajan hetkellä kaavan 7 mukaan, vaikka se ei olisikaan luonteeltaan puhtaasti resistiivinen. Työn kokonaisuuden kannalta voidaan keskittyä resistiivisiin kuormiin ja niiden sijaiskytkentöjen toteutukseen aktiivikomponenteilla.

$$R = \frac{u(t)}{i(t)} = \frac{p(t)}{i(t)^2} = \frac{u(t)^2}{p(t)} \quad (\text{Kaava 7})$$

Kun käsitellään muun kuin resistiivisen kuorman resistanssia, käytetään yleensä dynaamisen resistanssin käsitettä. Dynaaminen resistanssi on kuormalle ominainen tietyssä toimintapisteessä. Se voidaan ilmaista jännitteen derivaattana virran suhteen tai jännitteen ja virran muutosten suhteena kaavan 8 mukaan. Kuvassa 1 on havainnollistettu dynaamista resistanssia.

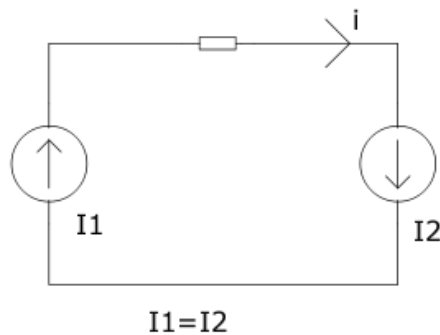


Kuva 1: Dynaaminen resistanssi

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{du}{di} \quad (\text{Kaava 8})$$

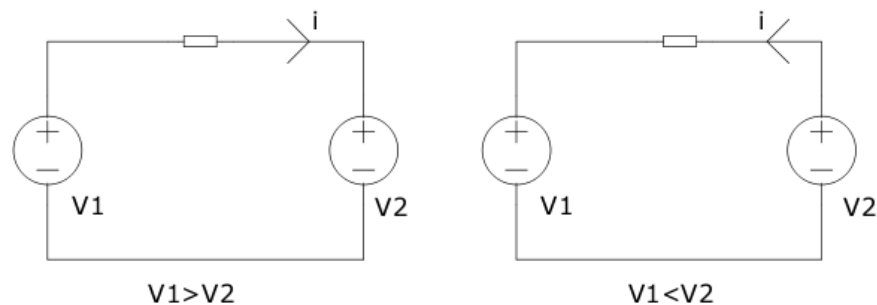
Käytettäessä vakiovirtalähdettä kuorman resistanssi ei ole nähtävissä suoraan, vaan se saadaan selville kuorman jännitteestä, virrasta ja tehosta kaavan 7 vaihtoehtojen mukaisesti. Kuorman kuluttama teho voidaan laskea kuten edelläkin, kun tiedetään tarvittavat kaksi parametria.

Kuormaa voidaan passiivisten elementtien lisäksi mallintaa myös vakiovirtalähteellä. Passiiviseen tapaukseen verrattuna kuorman luonne on kuitenkin muuttunut, nyt kuorma sisältää lähteen. Kuvan 2 mukaisessa kytkennässä yksi vakiovirtalähde kuvaa lähdettä ja toinen vakiovirtalähde kuormaa. Tarkasteltaessa kytkentää piirielementtitasolla, ei voida erottaa kumpi vakiovirtalähteistä on lähde ja kumpi kuorma. Voidaan kuitenkin sopia keskinäisistä rooleista ja merkitä niitä sopimuksen mukaisesti. Näin voidaan lähde ja kuorma erottaa toisistaan abstraktilla tasolla. Piirielementteinä ne ovat täysin toisiaan vastaavat ja niiden paikkoja voidaan vaihtaa. Tämän perusteella voidaan kuorman käsitettä laajentaa, kuorman teho voi olla positiivinen tai negatiivinen.



Kuva 2: Vakiovirtalähde lähteenä ja kuormana

Kuormaa voidaan mallintaa edellisten tapausten lisäksi myös vakiojännitelähteellä. Koska vakiojännitelähde pyrkii pitämään jännitteensä aina samana, virran suunta riippuu virtapiirin muista komponenteista. Esimerkiksi syötettäessä kuormana olevaa vakiojännitelähdettä toisella vakiojännitelähteellä, riippuu virran suunta jännite-erosta, kuten kuvassa 5. Virta voidaan saada kulkemaan saman kuorman läpi kumpaankin suuntaan tahansa, joten voidaan päätellä virran etumerkin ja suuruuden voivan vaihdella kuorman pysyessä vakiona.



Kuva 3: Virran suunta vakiojännitekuormassa.

Laajemman käsitteen mukaan kuorma voi olla mikä tahansa elementti jonka käyttäytymistä piirissä kuvaa sille ominainen UI-käyrä. Korkeammalla abstraktiotasolla kuorma voidaan mallintaa mustana laatikkona, jonka sisäistä kytkentää ei tarvitse tietää. Riittää että tunnetaan kuorman käyttäytyminen haluttujen muuttujien, kuten jännitteen, virran ja ajan funktiona. Mikä tahansa kuorma on mahdollista toteuttaa halutun vasteen antavalla mustalla laatikolla.

## 2.2 Säädetävän aktiivisen kuorman määrittely

Erään määritelmän mukaan aktiivisessa kuormassa korvataan resistanssi, induktanssi tai kapasitanssi niiden toiminnallisuuden toteuttavalla transistorikytkennällä [1]. Määrittelyä hieman vapaammin tulkiten voidaan se saattaa muotoon, jossa mikä tahansa kuorma voidaan toteuttaa aktiivisen elementin avulla. Aktiivisessa elementissä voidaan käyttää transistoreja tai muita vastaavia komponentteja virran ja jännitteen säätelyyn.

Säädettävyyttä lisää aktiiviseen kuormaan mahdollisuuden muuttaa kuorman parametreja käytön aikana. Voidaan esimerkiksi moduloida säädetävän aktiivisen kuorman ottamaan virtaa ulkoisella signaalilähteellä. Signaalilähde voi tietenkin olla myös kuormaan integroitu, vaikkapa sulautettu järjestelmä. Säädetävällä aktiivisella kuormalla voidaan saada esimerkiksi kuorman virta vaihtelevaan halutun aaltomuodon mukaisesti.

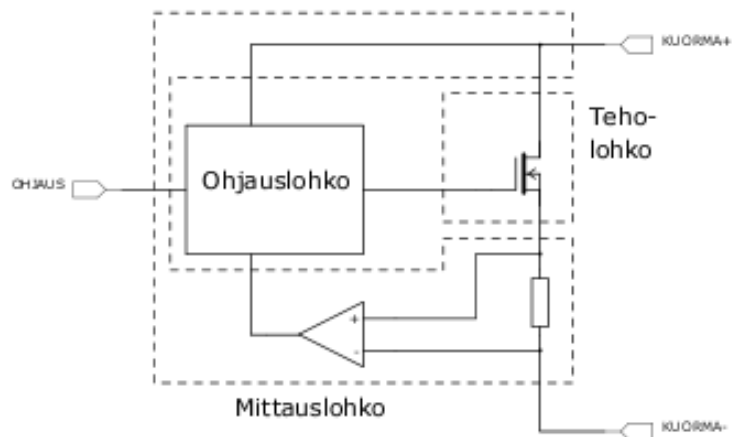
## 2.3 Kuormien nimitykset

Säädettävistä aktiivisista kuormista käytetään sovelluksesta riippuen hieman vaihtelevia nimiä. Elektroniikan testaukseen tarkoitetuissa järjestelmissä niitä kutsutaan yleensä elektronisiksi kuormiksi. Elektroninen kuorma erään määritelmän mukaan kykenee kuluttamaan tasavirtaa säädetyllä tavalla [2]. Kuorman yhteydessä esiintyvä sana aktiivinen korvataan toisinaan sanalla dynaaminen. Aktiivinen korostaa ehkä enemmän kuorman sisäistä rakennetta, sen toteutustapaa aktiivisilla komponenteilla. Dynaaminen kuvaa kuorman ulkoista käyttäytymistä, sen muuttuvaa ja joustavaa luonnetta. Kummallakin merkintätavalla kuitenkin viitataan samantyyppiseen kuormaan.

Terminologian selkeyttämiseksi tässä työssä käytetään pääosin termiä aktiivinen kuorma kaikentyyppisten aktiivisten kuormien osalta, ottamatta kantaa niiden säädettävyyteen tai käyttösovellukseen. Kuitenkin käsiteltäessä esimerkiksi kaupallisia elektroniikan testaukseen tarkoitettuja laitteita, pyritään käyttämään niistä valmistajan kanssa yhteneviä termejä.

## 2.4 Aktiivisen kuorman rakenne

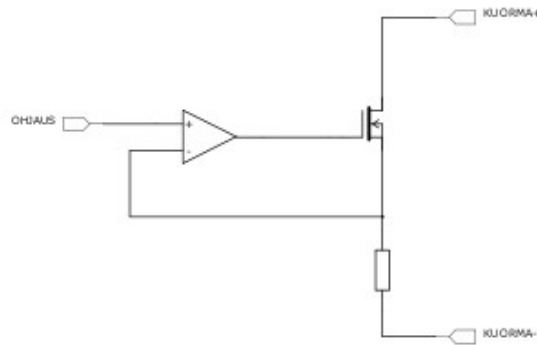
Aktiivisen kuorman toiminta perustuu pitkälti kuorman jännitteen ja virran mittaukseen sekä aktiivisen elementin parametrien säätämiseen takaisinkytkennän kautta. Aktiivisen kuorman kytkentä voidaan jakaa kolmeen toiminnalliseen lohkoon kuten kuvassa 4. Teholohko muodostuu aktiivisesta tehoa säättävästä elementistä ja sen mahdollisista oheiskomponenteista. Oheisessa kuvassa säätöelementtinä on käytetty FETtiä, yhtä hyvin sen tilalla voisi olla jokin muu. Mittauslohko muodostuu kuorman oleellisten parametrien mittauselektronikasta, yleisimpinä jännitteen ja virran mittaus. Ohjauslohko pyrkii pitämään kuorman ohjaussignaalin mukaisessa asetusarvossa ohjaamalla tehlohkoa mittauslohkolta saatavan tiedon perusteella. Riippuen ohjauslohkon toteutuksesta, voidaan kuormaa ajaa useissa eri toimintamuodoissa.



Kuva 4: Aktiivisen kuorman perusrakenne

Toimintamuodoista yksinkertaisin tällä toteutustavalla on virtakuorma. Kuvassa 26 on esitetty takaisinkytketty virtakuorma, joka on kuvan 4 yleisestä tapauksesta yksinkertaistettu malli. Koska virtakuorman ei tarvitse välittää kuorman jännitteestä, jännitteen mittausta ei tässä kytkennässä tarvita. Ohjaussignaalin avulla asetetaan jokin virta-arvo, jossa ohjauslohko kuorman läpi kulkevan virran pyrkii pitämään. Takaisinkytkentä saadaan mittaamalla jännitettä kuormavirran reitille asetetun vastuksen ylitse.





Kuva 5: Takaisinkytketty virtakuorma

## 2.5 Aktiivisen kuorman toimintamuodot

Aktiivisten kuormien kolme keskeisintä toimintamuotoa ovat vakioresistanssi (CR), vakiovirta (CC) ja vakiojännite (CV)[2]. Säädetävyyden kautta kuorman parametreja voidaan tietenkin muuttaa, jolloin saadaan säädetty resistanssi, säädetty virta ja säädetty jännite. Kuitenkin säädettyäkin kuormaa voidaan tietyssä toimintapisteessä mallintaa vakiokuormana. Toimintamuotojen tarkastelussa voidaan siis käyttää vakiokuormia.

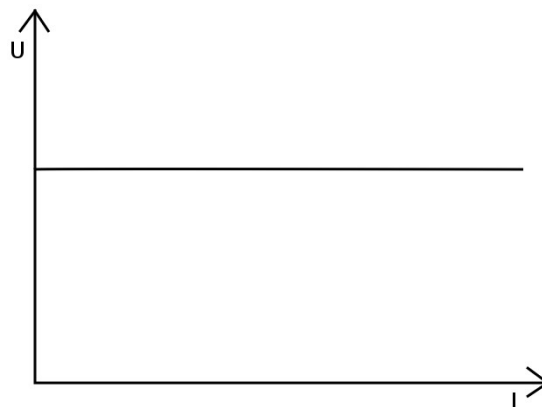
Aluksi tarkasteltavissa toimintamuodoissa, joihin edellä listatut keskeiset toimintamuodot kuuluvat, aktiivinen kuorma toimii UI-tasossa. Ajalla ei ole merkitystä, ainoastaan jännitteen ja virran keskinäisellä suhteella. Tällaisia toimintamuotoja voidaan kuvata UI-käyrällä, jossa esitetään jännitteen ja virran riippuvuutta toisistaan. Kyseinen riippuvuus on kaikilla ajan hetkillä sama, mikä tekee aktiivisen kuorman toteutuksesta ja tarkastelusta yksinkertaisempaa.

Aktiivisen kuorman toimiessa virtalähteenä ohjauslohko pyrkii pitämään kuormavirran asetetussa arvossa. Säätoelementin resistanssia on siis muutettava kuorman yli olevan jännitteen mukaan. Vakiovirtaa voidaan esittää kuvan 6 mukaisella UI-käyrällä, jossa kaikilla jännitteen arvoilla virta pysyy samana.



Kuva 6: Jännite ja virta vakiovirralla

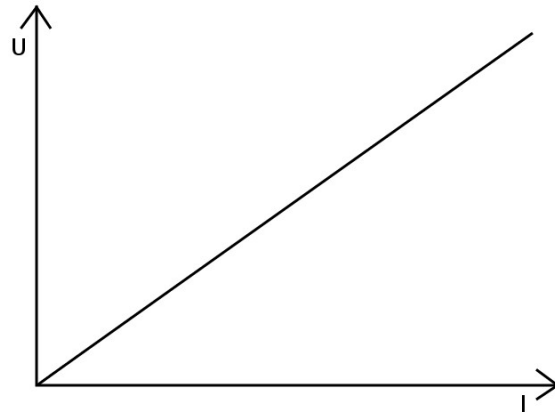
Aktiivisen kuorman toimiessa jännitelähteenä ohjauslohko pyrkii pitämään kuorman yli olevan jännitteen vakiona. Tässä muodossa toiminta vastaa shunttiregulaattorin toimintaa, säätöelementin läpi kulkevaa virtaa muuttamalla pyritään pitämään jännite vakiona. Vakiojännitettä voidaan esittää kuvan 7 mukaisella UI-käyrällä, jossa kaikilla virran arvoilla jännite pysyy samana.



Kuva 7: Jännite ja virta vakiojännitteellä

Kuorman toimiessa resistanssina ohjauslohko pyrkii säätämään kuormavirtaa kuorman yli olevan jännitteen funktiona niin, että ulospäin kuorman resistanssi vaikuttaa vakiolta. UI-käyrän tulisi olla kuvan 8 kaltainen suora viiva, jossa resistanssi on käyrän kulmakerroin kaavan 9 mukaisesti. Virran ja jännitteen muutosten suhde on siis pyrittävä pitämään asetetussa arvossa, jolloin resistanssi pysyy vakiona.

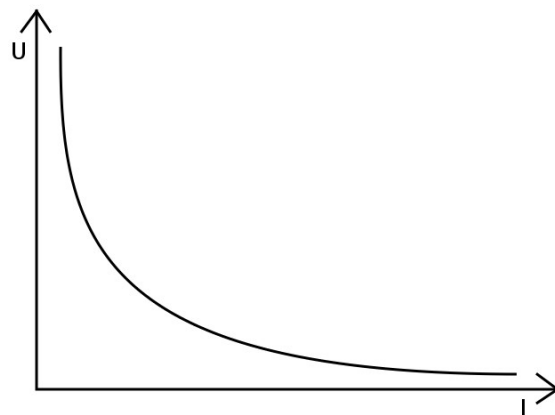
$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (\text{Kaava 9})$$



Kuva 8: Jännite ja virta vakioresistanssilla

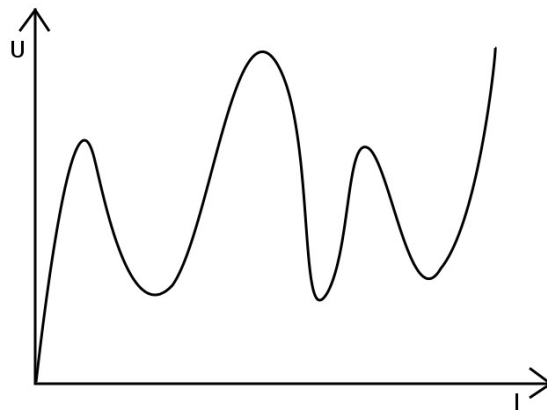
Vakioteho on myös yleinen aktiivisen kuorman toimintamuoto, vaikka sitä ei luetaakaan keskeisimpien toimintamuotojen joukkoon. Ohjauslohko pyrkii säätämään kuormavirtaa kuorman yli olevan jännitteen funktiona niin, että kuorman ottama teho pysyy vakiona. Kuorman ottama teho voidaan ilmaista jännitteen ja virran tulona kaavan 10 mukaan, jolloin UI-käyrä on kuvassa 9 esitetyn kaltainen. Vakioteho ei ole yleensä aivan yhtä suoraviivaisesti toteutettavissa kuin edeltävän kolme toimintamuotoa, joten se on niitä vähemmän käytetty.

$$P = UI \quad (\text{Kaava 10})$$



Kuva 9: Jännite ja virta vakioteholla

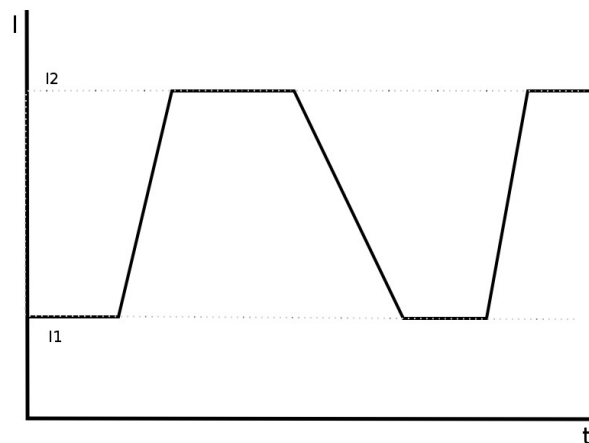
Kuorman UI-käyrän ei toisaalta tarvitse muistuttaa mitään ideaalista tai reaali maailman komponenttia, vaan se voidaan valita myös täysin mielivaltaisesti. Eräs tällainen UI-käyrä on esitetty kuvassa 10. Mielivaltaisen UI-käyrän toteutuksessa voidaan käyttää esimerkiksi mikrokontrolleria tai signaaliprosessoria, jolloin toteus on joustava ja helposti muokattavissa.



Kuva 10: Mielivaltainen UI-käyrä

## 2.6 Aktiivisen kuorman toiminta aikatasossa

Aktiivisia kuormia voidaan käyttää myös toimintatilassa, jossa kuorman parametreja muutetaan jatkuva-aikaisesti. Tästä toimintatilasta käytetään usein nimitystä dynaaminen toimintatila. Yleisimmissä tapauksissa kuormitus vaihtelee kahden tason välillä pulssimaisesti. Näin saadaan aikaan nopea virran muutos ja sen myötä transienttitilanteita. Tilanne on esitetty kuvassa 11, jossa nousu- ja laskunopeuksia on havainnollisuuden vuoksi korostettu. Dynaamisessa toimintatilassa aktiivinen kuorma voi toimia jossain perustoimintamuodossa, yleisimmin käytetty on vakiovirta. Myös pulssien nousu- ja laskunopeuksia on mahdollista säätää halutun tilanteen aikaansaamiseksi. Joissain tapauksissa säädöt tehdään taajuuden ja pulssisuhteen kautta, toisissa taas saatetaan käyttää signaalin ylhäällä- ja alhaallaoloaikoja.

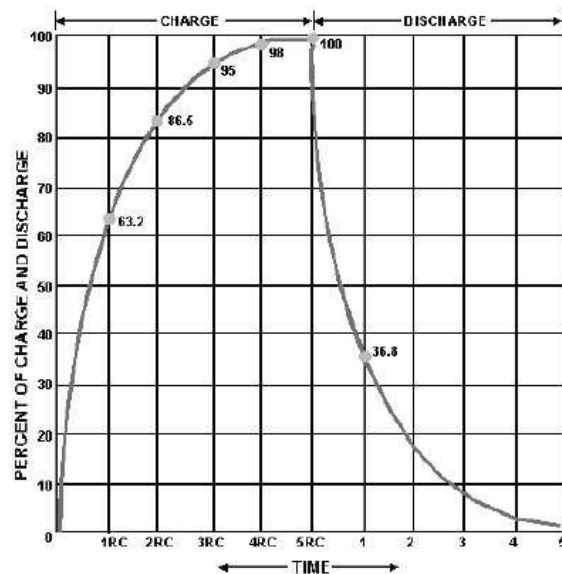


Kuva 11: Virta dynaamisessa toimintatilassa

Dynaamisen toimintatilan ei tietenkään ole pakko rajoittua vain kahden tason väliin vaihteluun. Aktiivisen kuorman virtaa, jännitettä, resistanssia tai muuta parametria voidaan moduloida millä tahansa halutulla signaalilla. Signaaliksi käy yhtä hyvin niin sini- kuin kanttiaalto, tai mikä tahansa saakaan aktiivisen kuorman käyttäytymään halutulla tavalla. Signaalilähde voi olla laitteeseen sisäänrakennettu tai voidaan käyttää erillistä signaalilähdettä.

Kun aktiivista kuormaa ohjataan aikatasossa, saadaan toteutettua lisää peruspiirielementtejä. Aikatasossa voidaan mallintaa esimerkiksi kapasitanssin vaikutusta. Kuvassa 12 ja kaavassa 11 on esitetty RC-aikavakion vaikutus kondensaattorin varautumiseen ja purkautumiseen. Ohjaamalla aktiivista kuormaa aikatasossa, voidaan sillä jäljitellä RC-piiriä eri tavoin. RC-piirin resistiivinen komponentti voidaan tarvittaessa määritellä nol-laksi, jolloin jäljellä jää pelkästään kapasitanssi. Kapasitanssin jäljittely vaatii usein älykkäämpää ohjauselektroniikkaa ja kuin aiemmin esitetyt perustoimintamuodot.

$$\tau = RC \quad (\text{Kaava 11})$$



Kuva 12: RC-piirin aikavakio

Kapasitanssia vastaavasti voidaan aktiivisella kuormalla jäljitellä myös induktanssia tai RL-piiriä. RL-piirin virran aaltomuoto muistuttaa RC-piirin jännitteen aaltomuotoa, joten sitä ei esitetä erillisenä kuvana. Aikavakion on kaavan 12 mukainen. RL-piiriin pätevät samat toimintaehdot kuin RC-piiriin.

$$\tau = \frac{R}{L} \quad (\text{Kaava 12})$$

Koska aktiivisella kuormalla voidaan jäljitellä induktanssia, kapasitanssia ja resistanssia, voidaan niillä luoda myös mikä tahansa edellisistä koostuva yhdistelmä. Mikään ei myöskään pakota tässä yhteydessä eri komponentteja olemaan millään tavalla lineaarisia tai edes reaalisia. Teoriassa aktiivisella kuormalla voidaan siis toteuttaa mikä tahansa kuorma jonka UI-käyrä ja aikatason käyttäytyminen on määritelty. Voidaan myös luoda määrittelyt kuvitteelliselle kuormalle, jota aktiivisen kuorman halutaan ulkoiselle kytkennälle edustavan. Käytännössä kuitenkin joudutaan toimimaan niissä rajoissa joita aktiivisen kuorman pääteaste ja ohjauslohko asettavat. Reaalimaailman komponentit kestävät vain äärellisen määrän virtaa ja jännitettä, eivätkä takaisinkytkentä ja säätökään ole äärettömän nopeita. Kuorman moniulotteisuuden myötä kasvaa myös sen ohjaamisen ja säädön vaikeus.

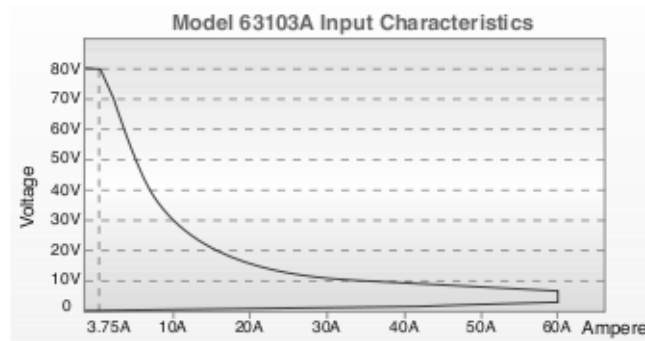
## 2.7 Aktiivisen kuorman keskeiset ominaisuudet

Jokaiseen käyttökohteeseen on valittava siihen soveltuva aktiivinen kuorma yksilöllisesti, huomioiden käyttökohteen asettamat vaatimukset ja aktiivisen kuorman ominaisuudet. Aktiivista kuormaa kuvaavien ominaisuuksien perusteella voidaan päätellä sen soveltuvuus. Jotta aktiivinen kuorma kestäisi hajoamatta käyttökohteessaan, on sen tietyiltä ominaisuuksiltaan täytettävä tai ylitettävä käyttökohteen asettamat vaatimukset. Näin tulee tapahtua ainakin suurimman mahdollisen jännitteen, virran ja tehon osalta.

Aktiivisella kuorma on yleensä selkeästi määritelty suurin mahdollinen jännite, jolle sen saa altistaa. Koska säätöelementtinä käytetään useimmiten puolijohteita, määräytyy suurin sallittu jännite enimmäkseen niiden jännitekestoisuuden mukaan. Myös mittauslohkon jännitekestoisuus saattaa joskus olla rajoitteena. Yleensä jo hetkellinenkin yli-jännite saattaa tuhota puolijohdekomponentteja.

Suurin mahdollinen virta asettaa myös rajoituksensa aktiiviselle kuormalle. Edellä todettu säätöelementin toteutus puolijohteilla johtaa myös rajoituksiin virran suhteen, sillä puolijohdekomponenteille on määritelty suurin sallittu virta. Usein suurin sallittu virta voidaan hetkellisesti ylittää, kunhan komponentin häviöt eivät nouse liian suuriksi.

Aktiiviselle kuormalle on määritelty suurimman jännitteen ja virran lisäksi myös suurin sallittu tehohäviö. Sallittu tehohäviö on edellisten ominaisuuksien tavoin riippuvainen käytetyistä puolijohdekomponenteista. Se harvoin on kuitenkaan suoraan suurimman jännitteen ja virran tulo, vaan rajoittuu kuvaa 13 mukaillen [9]. Kuvassa on esimerkkinä tuotu esille Chroma 63103A sallittu toiminta-alue. Aktiivista kuormaa ei voi altistaa suurimmalle sallitulle jännitteelle ja virralle yhtäaikaaisesti, vaan suurin sallittu teho rajoittaa käyttöalueen.



Kuva 13: Aktiivisen kuorman sallittu toiminta-alue

Edellisten kovempien rajoitusten lisäksi aktiivisella kuormalla on joukko muita ominaisuuksia, jotka määrittelevät sen käyttökelpoisuuden suunnitellussa kohteessa. Eräs näistä ominaisuuksista on aktiivisen kuorman pienin toimintajännite. Jos kuorman yli oleva jännite putoaa alle ilmoitetun minimiarvon, aktiivinen kuorma ei enää pysy toiminta-alueellaan. Tämä rajoitus johtuu säätöelementin ja mahdollisen mittauselektronii-kan aiheuttamasta resistanssista. Jos resistanssia on liikaa, pienellä jännitteellä ei aktiivisen kuorman läpi saada tarpeeksi virtaa. Pienin toimintajännite ilmoitetaan yleensä virran funktiona.

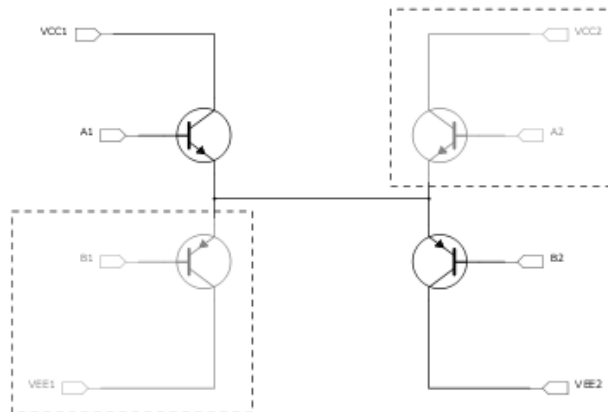
Jos kuorman yli oleva jännite pyrkii vaihtelevaan nopeasti, myös aktiivisen kuorman taajuusvasteella on merkitystä. Jos aktiivinen kuorma ei pysty vastaamaan jännitteen vaihteluun tarpeeksi nopeasti, se ei pysy toiminta-alueellaan. Taajuusvaste riippuu suurelta osin kytkennässä käytetyn takaisinkytkennän ominaisuuksista. Vaikka myös säätöelementin nopeus vaikuttaa taajuusvasteeseen, se ei nykyaikaisten komponenttien kanssa aiheuta ongelmaa. Kaupallisissa aktiivisissa kuormissa ei yleensä näe mainintaa taajuusvasteesta, sillä ne on tarkoitettu lähinnä hitaanpuoleisesti muuttuville tasajännitteille.

Jos laitteessa on dynaaminen toimintamuoto, sen suurin taajuus on yleensä ilmoitettu. Ilmoitettu taajuus on yleensä laitteen sisäisen transienttigeneraattorin tuottama suurin taajuus. Tämä arvo ei siis kerro suoraan mitään laitteen sisäisen rakenteen ominaisuuksista, ainoastaan rajoista jotka sille on päätetty valita. Jos laitteessa on mahdollisuus käyttää ulkoista ohjaussignaalia, saattaa sille luvattu taajuusalue poiketa sisäisen transienttigeneraattorin vastaavasta. Aktiivisen kuorman virralla ja jännitteellä on äärelliset nousu- ja laskunopeudet. Yksinkertaisemmissa kytkennöissä nousu- ja laskunopeudet eivät yleensä ole säädettävissä, vaan ne on valittu kiinteiksi. Nopeudet voivat kuitenkin vaihdella aktiivisen kuorman toimintapisteen mukaan jonkin verran. Nousu- ja laskunopeudet kuitenkin pyritään pitämään alueella jossa muutos on riittävän nopea jotta haluttu aaltomuoto ja transienttivaikutus säilyvät. Liian suuret muutosnopeudet saattavat toisinaan aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä, joten suorituskyvyn liiallinen optimointi ei aina ole paras ratkaisu.

Joihinkin sovelluksiin voidaan haluta säädettäviä nousu- ja laskunopeuksia, ja sellaisia kalliimman luokan kaupallisista ratkaisuista löytyykin. Nousu- ja laskunopeuksien säädöt voivat olla toisistaan riippuvia tai riippumattomia. Valittaessa taajuuteen nähden hyvin hitaat nousu- ja laskunopeudet alkaa ulostulo muistuttamaan kolmioaaltoa, mikä saattaa joskus olla haluttu ominaisuus.

## 2.8 Aktiiviset kuormat ja tehrolähteet

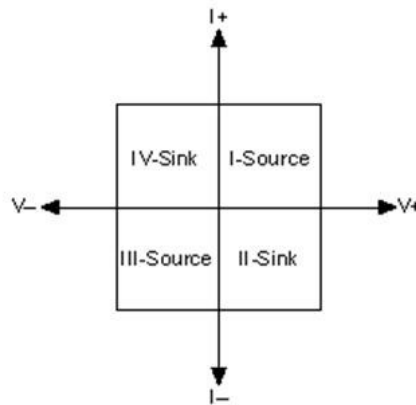
Aktiivisilla kuormilla ja tehrolähteillä on paljon yhteistä. Oikeastaan niitä voidaan pitää samana laitetyyppinä, jotka eroavat toisistaan vain toimintamuodon osalta. Tehrolähde voi olla esimerkiksi vakiojännitelähde tai vakiovirtalähde, kuten aktiivinen kuormakin. Erona on yleensä vain virran ja tehon suunta. Tehrolähde ja aktiivinen kuorma ovatkin toistensa komplementteja. Riippuen siitä kummasta on kyse, voidaan toiminnan kannalta merkityksettömät osat jättää pois. Kuvassa 14 on havainnollistettu asiaa kytkemällä vasemmalle puolelle tehrolähde ja oikealle aktiivinen kuorma. Kuva on tietenkin äärimmäisen yksinkertaistettu, sillä siinä on kuvattu ainoastaan pääteasteen virtaa ohjaavat komponentit.



Kuva 14: Virtalähde ja virtakuorma

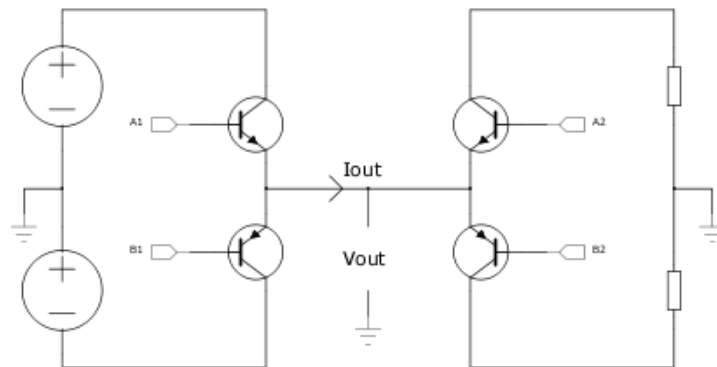
Toisinaan samaan laitteeseen voidaan yhdistää tehrolähteen ja aktiivisen kuorman ominaisuudet. Tällaisessa laitteessa käytetään yleensä vuorovaiheista pääteastetta, jollainen on yleinen esimerkiksi audiovahvistimissa. Audiovahvistimissa eräs tyypillinen pääteasteen rakenne on esitetty edellä kuvassa 14. Kun otetaan mukaan myös kuvassa katkoviivan sisään jätetty pääteasteen toinen puoli, saadaan vuorovaiheinen pääteaste. Tällainen rakenne kykenee ajamaan virtaa kumpaankin suuntaan tahansa, mikä on usein hyödyllinen ominaisuus. Jos kytkennän käyttöjännitteet sijaitsevat nollapotentialin molemmilla puolilla, voi myös sen ulostulon polariteetti vaihdella. Yleisesti vuorovaiheisen pääteasteen toiminta voidaan esittää kuvan 15 mukaisesti, jaettuna neljään eri alueeseen virran ja jännitteen etumerkin mukaan.





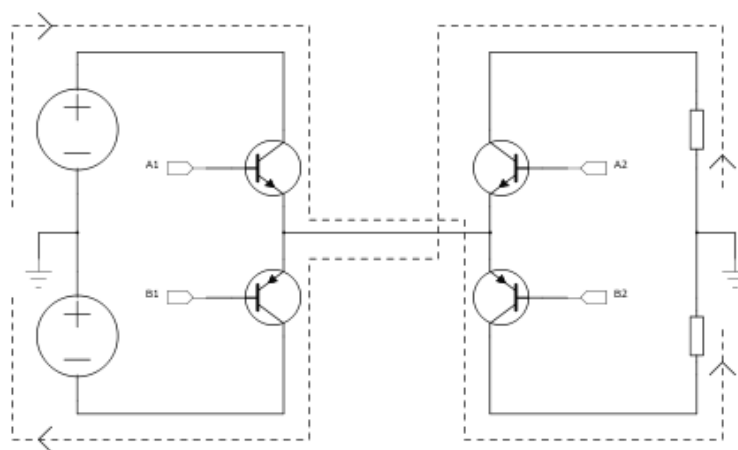
*Kuva 15: Vuorovaiheisen pääteasteen toiminta*

Kuvassa 16 on esitetty vasemmalla teholähde ja oikealla aktiivinen kuorma. Kuten jälleen huomataan, rakenne on kummassakin tapauksessa sama. Ero eri puolien toimintaan saadaan aikaan lähteiden sijoittelulla kytkennässä. Tässä esimerkkitapauksessa lähde on teholähteen puolella jännitelähteen muodossa. Voidaan sanoa että teho tuotetaan tehon puolella kytkentää. Aktiivisen kuorman puolelle on kytketty vastukset lähinnä symbolisoimaan tehon kulutusta. Sama toimintohan voidaan toteuttaa virtaa ohjaavilla elementeillä, jotka tässä on kuvattu BJT-transistoreina. Kytkennän avulla voidaan kuitenkin havainnollistaa pääteasteiden toimintaa. Kummallakin pääteasteella on neljä eri tilaa, koska kumpikin transistori voi olla johtotilassa tai sulkuilassa. Tarkastelun ulkopuolelle voidaan jättää tapaukset joissa molemmat transistorit johtavat tai kumpikaan ei johda. Jos kumpikaan ei johda, on se sama kuin koko pääteastetta ei olisi lainkaan. Jos taas molemmat johtavat, pääteaste oikosulkee syöttävän lähteen. Jäljelle jää siis kaksi toimintatilaa.



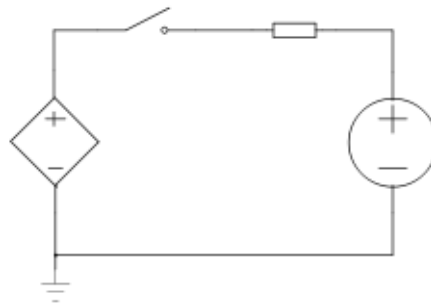
*Kuva 16: Teholähde ja aktiivinen kuorma*

Koska pääteasteiden virtaa ohjaavat transistorit ovat yksisuuntaisia, kuvan 16 mukaisessa kytkennässä kulkee haluttu virta vain kun vastakkain asetetut pääteasteet ovat eri tilassa. Näin ollen virta kulkee aina kytkennässä kuvan 17 mukaisesti, pääteasteiden ristikkäisiä transistorireja myöden. Kun palataan kuvan 15 esittämiin neljänneksiin, havaitaan kytkennässä tehonlähteen toimivan I- ja III-neljänneksissä. I-neljänneksessä ulostulojännite ja virta ovat kummatkin positiivisia. III-neljänneksessä virran suunta ja tulostulojännite ovat kummatkin negatiivisia. Kun tilanteita tarkastellaan kuorman kannalta, huomataan sen toimivan II- ja IV-neljänneksissä. II-neljänneksessä se toimii tehonlähteen ollessa I-neljänneksessä, joten ulostulojännite on positiivinen. Virran on tietenkin kuorman puolella oltava vastakkaismerkkinen tehonlähteeseen verrattuna, joten se on negatiivinen. Samoin voidaan sanoa kuorman toimivan IV-neljänneksessä kun tehonlähde on III-neljänneksessä. Jännite on tällä kertaa negatiivinen, mutta virta positiivinen.



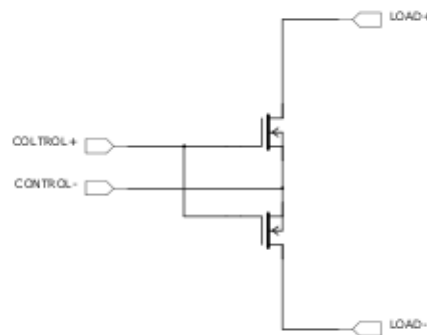
Kuva 17: Virran kulku pääteasteissa

Jos aiemmin esitetetyn yksipuoleisen pääteasteen virtaa ohjaavat elementit vaihdetaan yksisuuntaisista kaksisuuntaisiin, antaa se lisää toimintamahdollisuuksia. Kun vielä kiinteäjännitteiset lähteet korvataan säädettävillä, päästään kuvan 18 esittämään kytkentään. Virtaa ohjaava elementit on korvattu kytkimellä, jotta voidaan karsia turhia yksityiskohtia. Kun kytkin nyt suljetaan, alkaa virta kulkea elleivät vastakkain joutuvat jännitelähteet täysin kumoa toisiaan. Virran suunta ei kuitenkaan enää ole vakio, vaan se voi virrata kytkimien läpi kumpaan suuntaan tahansa. Suunnan määrää kuormana olevan jännitelähteen ja säädettävän jännitelähteen jännitteiden erotus. Jos sisäinen säädettävä jännitelähde säädetään antamaan korkeampaa jännitettä kuin kuormana oleva, toimii kytkentä tehonlähteenä. Mutta säädettäessä sisäisen säädettävän tehonlähteen jännite alemmaksi kuin ulkoisen kuorman jännite, tilanne muuttuu ja toimitaan kuormana. Edeltävien esimerkkien pohjalta voidaan päätellä, että on mahdollista toteuttaa laite joka toimii sekä tehonlähteenä että kuormana.



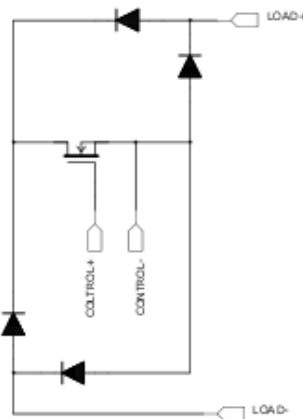
Kuva 18: Kaksisuuntainen yksipuolinen pääteaste

Kaksisuuntaisen ohjauselementin toteutukseen löytyy useita tapoja, niistä esitetään kahden toteutuksen toimintaperiaate. Ensimmäinen toteutus on esitetty kuvassa 19. Kytkenässä kaksi MOSFET:tä on kytketty lähteet vastakkain. Komponenteissa olevat loisdiodit joita kuvassa ei näy, ovat myös kytkettynä vastakkain jolloin virta ei kulje niiden kautta kuten se tekisi yhden MOSFETin tapauksessa. Differentiaalisella ohjausjännitteellä voidaan säätää MOSFETtien hilajännitettä ja edelleen läpi kulkevaa virtaa. Kytkenää käytetään hyvin laajalti puolijohdereleissä, joissa sen ohjauksessa käytetään optoerottimia.



Kuva 19: Kaksisuuntainen ohjauselementti, toteutus 1

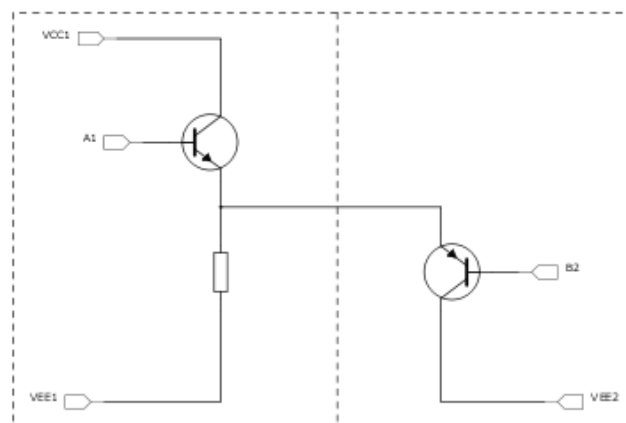
Toinen kaksisuuntainen ohjauselementti on esitetty kuvan 20 kytkennässä. Siinä MOSFET on asetettu diodeilla muodostetun tasasuuntaussillan sisään. Näin kuorman polariteetilla ei ole merkitystä, koska MOSFETin yli se näkyy aina positiivisena. Käytetty menetelmä on tuttu tyristorien kanssa käytetystä kytkennästä, yleisesti ottaen sillä voidaan ohjata polarisoidulla elementillä polariteetiltaan vaihtelevaa kuormaa. Haittapuolena on diodien aiheuttama jännitehäviö, mutta riippuu täysin sovelluksesta onko se merkittävä.



Kuva 20: Kaksisuuntainen ohjauselementti, toteutus 2

Edellä esitettyjä kaksisuuntaisia ohjauselementtejä voidaan hyödyntää muutenkin. Niitä voidaan käyttää esimerkiksi aktiivisen AC-kuorman toteutukseen. Aktiiviselle AC-kuormalle voidaan löytää käyttökohteita aina audiovahvistimien testaamisesta sähkövoimatekniikan sovelluksiin asti. Tämän työn puitteissa niihin ei kuitenkaan tutustuta, vaan pysytellään yleisemmin käytetyissä DC-kuormissa.

Kuten jo aiemmin kuvaa 14 tarkasteltaessa todettiin, kaikkiin käyttökohteisiin ei tarvita vuorovaiheista pääteastetta. Useissa tapauksissa riittää yksipuoleinen pääteaste, tai vuorovaiheinen pääteaste joka on virranohjauskyvyltään epäsymmetrisesti mitoitettu. Käyttämällä kohteeseen soveltuvaa pääteastetta voidaan usein jättää toiminnallisuuden kannalta epäoleellisia osia pois. Näin voidaan paitsi säästää komponenttikuluissa ja piirilevytilassa, myös saada laite luotettavammaksi yksinkertaisemman rakenteensa kautta. Esimerkki tästä on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21: Teholähde ja kuorma, oleelliset osat

Vasemmalla puolella olevan teholähteen pääteasteen alempaa puolta ei tarvita, joten se on korvattu vastuksella. Vastuskaan ole ehdottoman tarpeellinen, mutta luo teholähteelle pienen minimikuorman ja estää hallitsemattoman ulostulojännitteen nousun. Jos kuormaa on muutenkin, ei vastusta tarvita. Oikealla puolella olevasta kuormasta on poistettu ylempi puoli, joka myös on tarpeeton. Koska kuorma ei sisällä lähdettä, ei tarvita myöskään vastusta korvaamaan poistettua pääteasteen puolikasta. Jäljelle on jäänyt yleisimmin käytetty teholähdetyyppi joka toimii ainoastaan I-neljänneksessä ja kuorma joka toimii vain II-neljänneksessä.

### 3. Käytännön sovelluksia

#### 3.1 Teholähteiden testaus

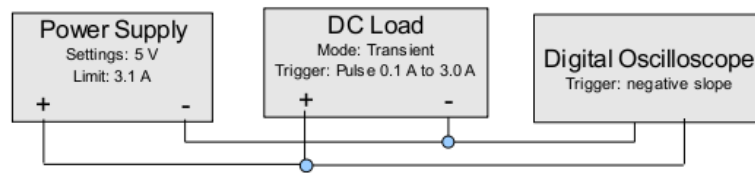
Aktiiviset kuormat soveltuvat erityisen hyvin teholähteiden testaukseen. Teholähteiden alati kasvavat vaatimukset lisäävät testauksen tarvetta. Varsinkin integroiduissa piireissä kehityksen yleinen suuntaus on kohti pienempiä käyttöjännitteitä. Koska laitteiden tehonkulutus ei oleellisesti ainakaan pienene, merkitsee se virran kasvua jännitteen las-  
kiessa. Käyttöjännitteiden las-  
kiessa myös sallittu rippelin määrä pienenee, joten teho-  
lähteiden tulee pystyä pitämään jännitteet entistäkin vakaampina.

Teholähteiden testaus voidaan jakaa pääosin kahteen ryhmään. Ensimmäinen ryhmä edustaa perusteellisempaa ja tarkempaa testausta, jota yleensä suoritetaan teholähteitä kehitettäessä. Teholähteiden tuotekehityksessä voidaan käyttää aktiivisia kuormia teho-  
lähteiden prototyyppien testaukseen, jotta saataisiin mahdollisimman paljon tietoa käy-  
tettyjen kytkentöjen käyttäytymisestä ja voitaisiin hyödyntää sitä lopullisen tuotteen ominaisuuksien parantamisessa. Samoja testausjärjestelmiä ja laitteita voidaan lopulta käyttää todentamaan suunnittelun onnistunut toteutus mittaamalla haluttuja suuria te-  
holähteen lopullisesta versiosta. Samalla voidaan tehdä määritellä suoritusarvot jotka toimivan teholähteen on täytettävä.

Toiseen ryhmään voidaan sisällyttää teholähteiden tuotannossa tapahtuva toiminnal-  
linen testaus. Kyseisen testauksen tarkoituksena on varmistaa, että valmistettu teholäh-  
de täyttää sille annetun määritelmän. Tällaisessa testauksessa voidaan käyttää hinnaltaan edullisempia ja ominaisuuksiltaan suppeampia mittalaitteita, koska tarkoitus on vain to-  
deta arvojen olevan sallituissa rajoissa. Mikään ei tietenkään estä käyttämästä tässäkin testauksessa samoja mittalaitteita kuin tuotekehityksessä, jos se on kokonaisuuden kan-  
nalta mielekäästä.

Ensimmäisen ryhmän tarkempia mittalaitteita voidaan käyttää myös tarkasteltaessa jonkin teholähteen soveltuvuutta tavallista kriittisempään ja vaativampaan kohteeseen. Jälkimmäisen ryhmän laitteiden toinen yleinen käyttökohde on teholähteiden huollossa ja korjauksessa. Vaikka suurpiirteisiä linjauksia erilaisten aktiivisten kuormien soveltu-  
vuudesta eri käyttökohteisiin voidaankin vetää, on kuitenkin aina huomioitava jokaisen tapauksen aiheuttamat erityistarpeet ja rajoitteet.

Eräs yleinen testausjärjestely on esitetty kuvassa 22. Siinä aktiivinen kuorma on kytketty testattavan teholähteen ulostuloon. Ulostulojännitettä mitataan oskilloskoopilla. Käytettäessä modernia digitaalista oskilloskooppia, voidaan helposti tallentaa aaltomuotoja myöhempää tarkastelua tai esimerkiksi dokumentaation kuvitusta varten. Aktiivinen kuorma onkin yleensä vain osa testausjärjestelyä ja vaatii rinnalleen muita testaus- ja mittalaitteita. [6]



Kuva 22: Teholähteen testausjärjestely

Aktiivista kuormaa käyttäen voidaan määrittää tehonlähteen UI-käyrä, josta nähdään tehonlähteen käyttäytyminen kuormituksen muuttuessa. Käyrää voidaan käyttää sellaiseenaan, tai siitä voidaan poimia arvoja muiden ominaisuuksien laskentaa varten. UI-käyrän mittaamiseen aktiivista kuormaa voidaan käyttää vakiovirtamuodossa, ja mitata tehonlähteen ulostulojännite halutuilla virran asetusarvoilla. Mitä useampi mittapiste, sitä kattavampi käyrästä. Usein jo osittain automatisoitu mittausjärjestelmä nopeuttaa mitausten suoritusta huomattavasti.

Aktiivisilla kuormilla voidaan kuormittaa tehonlähteitä vaihtelevasti ja muuttaa niiden toimintapistettä. Käyttämällä aktiivista kuormaa voidaan mitata tehonlähteen kuormaregulaatio, eli ulostulojännitteen vaihtelu virran funktiona. Kaavaa 13 on yleisesti käytetty kuormaregulaation laskemiseen, kun regulaatio ilmoitetaan prosentteina. Laskentaan tarvitaan ulostulojännitteen arvo nimelliskuormalla, suurimmalla sallitulla kuormalla ja pienimmällä sallitulla kuormalla. [5]

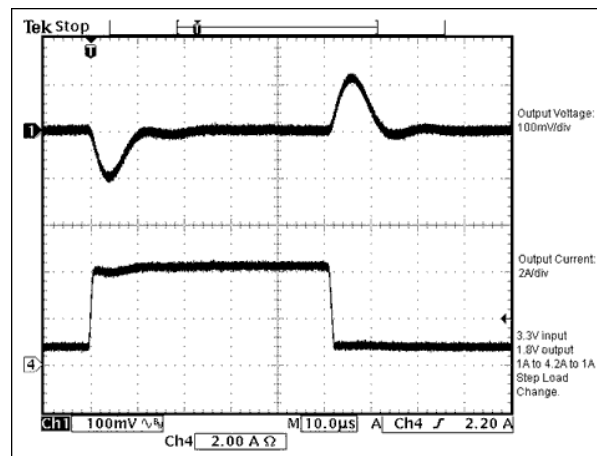
$$Loadreg = 100 \frac{V_{max} V_{min}}{V_{nom}} \quad (\text{Kaava 13})$$

Aktiivisia kuormia voidaan käyttää myös tehonlähteiden muiden perusominaisuuksien mittaamiseen. Voitaessa kuormittaa tehonlähdettä eri tavoin, voidaan helposti mitata sen hyötysuhdetta eri toimintapisteissä. Tällöin on tietenkin mitattava myös tehonlähteen syöttöjännite ja virta, joten edellä esitetty yksinkertainen mittausjärjestely vaatii lisäyksiä. Hyötysuhde voidaan laskea tehonlähteen ottotehon ja antotehon suhteesta kaavan 14 mukaan.

$$Effic. = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (\text{Kaava 14})$$

Kuormitusvirtaa kasvattamalla voidaan myös todeta teholähteen ylivirtasuojauksen tai virtarajoituksen toimivuus. Jännitekuormalla vastaavasti voidaan tarkastaa mahdollisten ylijännitesuojien toiminta. Näin voidaan testata suojauspiirejä hallitusti, aiheuttamatta vahinkoa testattavalle laitteelle. Myös virta- ja jännitearvot joilla suojat toimivat, voidaan määrittää melko tarkasti.

Aktiivisten kuormien suurin etu tulee kuitenkin esiin, kun siirrytään tutkimaan teholähteen transienttivastetta ja stabiilisuutta. Käyttämällä aktiivista kuormaa dynaamisessa toimintatilassa voidaan tuottaa nopeasti muuttuvia kuormituksia teholähteelle ja ajaa sitä toimintapisteestä toiseen. Kuormavirran kasvaessa nopeasti teholähteen jännite pyrkii laskemaan. Vastaavasti kuorman nopeasti keventyessä teholähteen jännite nousee. Näistä aiheutuu kuvan 23 kaltaisia piikkejä teholähteen ulostulojännitteeseen.



Kuva 23: Kuormituspiikki

Teholähteiden transienttikäyttäytymisen tuntemisen tärkeys on korostunut käytettävien taajuuksien ja virtojen kasvaessa sekä jännitteiden laskiessa. Erityisesti integroitujen piirien koon skaalautuminen jatkuvasti pienemmäksi tiukentaa vaatimuksia. Jo suhteellisen pieneltä tuntuva transienttitilanteessa ilmenevä jännitepiikki saattaa aiheuttaa häiriöitä tai pahimmillaan vaurioittaa piirejä. Myöskään jännitteen notkahtaminen ei ole hyväksi, kun tavoitteena on tehdä luotettavasti toimivia laitteita.

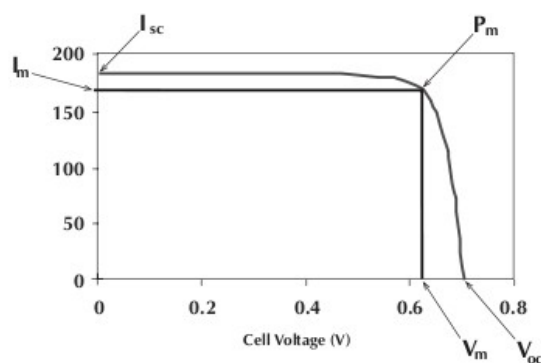


Suuri osa nykyisin käytettävistä digitaalisista integroiduista piireistä perustuu CMOS-tekniikkaan. Sille ominaista on hyvin pieni virrankulutus staattisessa tilassa ja lyhytkestoinen virtapiikki kun logiikkaelementtien tilaa muutetaan. Usein käytetyissä synkronisissa piireissä muutos tapahtuu kellosignaalin tahdissa, jolloin suuri joukko logiikkaelementtejä vaihtaa tilaansa yhtäaikaaisesti. Tästä luonnollisesti seuraa että useampi elementti integroidun piirin sisällä muodostaa suuremman virtapiikin. Tilannetta voidaan hieman kärjistää verrata kuormaan, joka hyppii pulssimaisesti minimi- ja maksimikuormituksen välillä. Juuri tällaista kuormitusta voidaan yksinkertaisenkin aktiivisen kuorman dynaamisella toimintamuodolla saada aikaan.

Hakkuriteholähteet ottavat myös virtaa pulssimaisesti, joten ne kuormittavat niitä syöttävää teholähdettä hieman samantyyllisesti kuin CMOS-logiikka. Aktiivisilla kuormilla voidaan siis paitsi testata teholähteitä, niin myös toteuttaa sellaista vastaava kuorma. Tilanne jossa tällaista testausta voidaan tarvita, on esimerkiksi jonkin elektronisen järjestelmän tehonsyöttö jossa on useampia hakkuriteholähteitä sarjassa. Huolellisella suunnittelulla ja riittävällä testauksella voidaan taata koko järjestelmän vakaa ja stabiili toiminta.

### 3.2 Aurinkopaneelien testaus

Aktiivisia kuormia voidaan hyödyntää myös aurinkopaneelien mittauksissa. Aurinkopaneelia voidaan testata erilaisissa ja vaihtelevissa olosuhteissa sen ominaisuuksien selvittämiseksi. Tärkeä yksittäinen tieto aurinkopaneelistä kussakin tilanteessa on sen UI-käyrä, josta käy ilmi jännitteen ja kuormitusvirran keskinäinen riippuvuus. Eräs tällainen käyrä on esitetty kuvassa 24. Samaan kuvaan on merkitty myös maksimitehopiste  $P_m$ , eli kuormitus jolla aurinkopaneelistä saatava teho on suurimmillaan. Samasta kuvasta löytyvät myös aurinkokennon oikosulkuvirta  $I_{sc}$  ja tyhjäkäyntijännite  $V_{oc}$ . [13]



Kuva 24: Aurinkokennon virta ja jännite

Aurinkokennosta saatava tehon voidaan katsoa riippuvan ensisijaisesti valon intensiteetistä ja toissijaisesti aurinkokennon lämpötilasta. Oikosulkuvirta on hyvin voimakkaasti riippuvainen aurinkopaneeliin kohdistuvan valon säteilyintensiteetistä. Tyhjäkäyntijännite sen ei muutu paljoakaan, olettaen että valoa on kuitenkin edes vähän. Toinen merkittävä tekijä valon intensiteetin lisäksi on aurinkokennon lämpötila, jonka noustessa tyhjäkäyntijännite hieman laskee. Lämpötilan noustessa myös oikosulkuvirta kasvaa, mutta ei merkittävästi.

Mittausjärjestely on yksinkertaisimmassa muodossaan hyvin samankaltainen kuin teholähteitä testatessa. Aurinkopaneelia kuormitetaan aktiivisella kuormalla, ja samalla mitataan käyttöön soveltuvalla laitteistolla virtaa ja jännitettä. Tässä sovelluksessa on mitä suotavinta, että mittauslaitteisto pystyy myös tallentamaan mitatut UI-käyrät myöhempää tarkastelua varten.

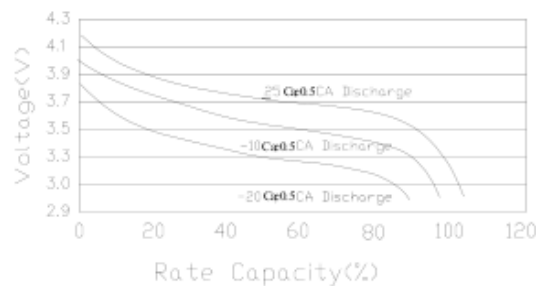
Aurinkopaneeleja voi testata useastakin syystä. Tarkoituksena on usein määrittää ominaisuuksiltaan tuntemattoman aurinkopaneelin keskeisiä arvoja tai varmentaa valmistajan tunnetulle aurinkopaneelille lupaamia arvoja. Useimmiten se tapahtuu hallituissa ja valvotuissa olosuhteissa, käyttäen valonlähdettä joka on ominaisuuksiltaan tunnettu. Aktiivista kuormaa käyttäen voidaan esimerkiksi mitata jatkuvasti uusia UI-käyriä vakiovalaistuksessa ja muuttumattomissa olosuhteissa pidettävästä aurinkopaneelistä. Useammasta mitatusta käyrästä voidaan tilastomatematiikan välinein muokata jokseenkin luotettava UI-käyrä määritellyissä olosuhteissa.

Mittausten kohteena voi olla myös aurinkopaneelin suunniteltu sijoituspaikka. Kun tutkittavaan paikkaan sijoitetaan ominaisuuksiltaan tunnettu aurinkopaneeli, voidaan siitä mitatuista UI-käyristä, oikosulkuvirrasta ja tyhjäkäyntijännitteestä päätellä jotain asennuspaikan hyvyydestä. Tietenkään yhtä hetkeä kuvaava käyrä ei vielä kerro juuri mitään, vaan mittauksista on kerättävä pidemmältä aikaväliltä. Koska vuodenaajat vaikuttavat voimakkaasti aurinkopaneelistä saatavaan tehoon, voivat mittaukset kokonaisuudessaan kestää useamman vuoden.

### 3.3 Akkujen testaus

Akkujen merkitys elektroniikassa on entisestään kasvanut mobiililaitteiden lisääntymisen ja niiden suorituskyvyn kasvamisen myötä. Vallitsevien mieltymysten mukaan akkujen pitäisi olla mahdollisimman kevyitä ja pieniä, samalla kun niiden kapasiteetin tulisi olla suuri. Toisaalta myös virranantokyvyn pitäisi olla hyvää luokkaa, jotta akkujen varassa käytettävä suorituskykyinen elektroniikka ylipäättään toimisi. Akkujen kehitys onkin viime aikoina ollut huomattavasti nopeampaa kuin ennen, joten myös akkujen testaukseen on panostettava aiempaa enemmän.

Eräs perusominaisuus jota akusta halutaan yleensä tietää on sen käyttöaika halutussa sovelluksessa. Tämän selvittämiseksi voidaan akkua kuormittaa vakiovirralla tai vakio-  
teholla ja piirtää purkauskäyriä joista nähdään napajännitteen vaihtelu purkauksen aika-  
na. Tiedettäessä sovelluksessa sallittu pienin akun jännite ja laitteen ottama teho, voi-  
daan käyttöaika riittävällä tarkkuudella arvioida. Käyriä tulisi tietenkin piirtää useita,  
vaihdellen käyttölämpötilaa, virtaa ja muita sovelluksessa muuttuvia tekijöitä. Kuvassa  
25 on esitetty Powestreamin H083448-mallisen litium-ioni-akun purkauskäyriä. [14]

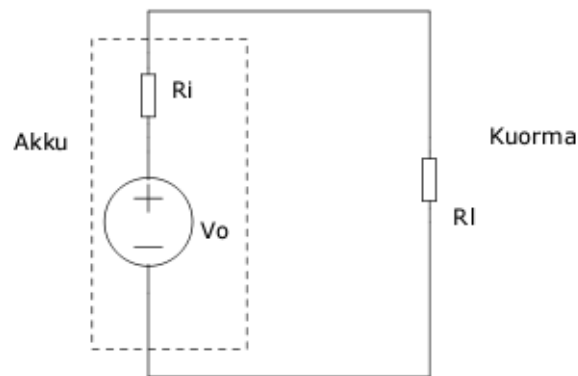


Kuva 25: Akun purkauskäyrä

Yleisempi tapa arvioida akun käyttöaikaa on sen ilmoitetun tai mitatun kapasiteetin avulla. Akkujen kapasiteetit ilmoitetaan ampeeritunteina. Kun tiedetään akun kapasiteetti ja laitteen virrankulutus, voidaan helposti laskea käyttöaika. Ongelmana kuitenkin on, että kapasiteetti on määritelty tietylle purkuvirralla jossakin lämpötilassa, joita käyttökohteessa esiintyvät olosuhteet eivät välttämättä vastaa lainkaan. Kapasiteetti ei myöskään kerro, mikä on ollut jännitteen alin arvo kapasiteettia määriteltäessä. Akun ilmoitetun kapasiteetin voidaan katsoa olevan suuntaa antava arvio.

Akulla on muitakin ominaisuuksia, joiden mittaamisessa voidaan käyttää hyväksi aktiivista kuormaa. Eräs keskeinen ominaisuus akussa on sen sisäinen resistanssi, jota voidaan mallintaa kuvan mukaisella sijaiskytkennällä. Sisäinen resistanssi vaikuttaa hyvin voimakkaasti akusta saatavaan suurimpaan virtaan ja myös akun jännitteen alenemaan virran mukaan. Sisäinen resistanssi voidaan laskea kaavalla . Laskemiseen tarvitaan akun jännite ilman kuormitusta, kuormituksen kanssa sekä kuormitusvirta.. Mitä suurempi käytetty virta on, sitä suurempi on myös akun jännitteenalenema. [6]

$$R_i = \frac{|V_l - V_o|}{i} \quad (\text{Kaava 15})$$



Kuva 26: Akun sisäinen resistanssi

Testauskokeen voitaisiin suorittaa kytkemällä vastus kuormaksi akulle ja mittaamalla jännitteet yleismittarilla. Mutta aktiivisella kuormalla akkua voidaan kuormittaa lyhytkestoisilla pulseilla, jolloin akun lämpötila ei mittauksen aikana nouse paljoakaan. Näin saadaan paitsi tarkempia tuloksia, myös akun purkautuminen ja rasitus on testissä vähäisempää. Haluttaessa voidaan aktiivista kuormaa käyttää tietenkin myös akkujen hallittuun purkamiseen. Joissain kuormissa voidaan asettaa jännitteen alaraja, jonka jälkeen akun purkaminen lopetetaan. Joidenkin akkutyypin purkaminen liian tyhjäksi voi olla niille vahingollista.

Akkujen testauksen lisäksi aktiivista kuormaa voi käyttää myös akkulateiden testaamiseen. Aktiiviselta kuormalta tosin vaaditaan tällaisessa tehtävässä hieman normaalia älykkäämpää ohjausta. Kuorma jäljittelee akun jännitettä ja virranottoa latauksen eri vaiheissa, jolloin voidaan tarkastella akkulaturin toimintaa. Voidaan myös aiheuttaa virhetilanteita, jotta nähdään miten testattava akkulaturi reagoi niihin.

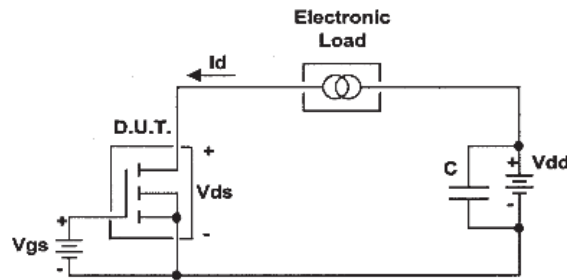
### 3.4 Puolijohdekomponenttien testaus

Puolijohdekomponenttien testauksessakin voidaan hyödyntää aktiivisten kuormien antamia mahdollisuuksia. Puolijohteet ovat nykyisessä elektroniikkateollisuudessa hyvin keskeisessä roolissa ja kehittyvät jatkuvasti.

Tehopuolijohteiden valmistajat lupaavat datalehdillään komponenteilleen joskus miltei liioiteltujakin suoritusarvoja. Esimerkiksi melko suuritehoiselle IRF540 FETille ilmoitetaan tietty transkonduktanssi 25°C lämpötilassa virran ollessa 17A ja jännitteen 50V. Komponentin tehohäviöksi kyseisillä arvoilla tulee 850W, joka on kuusinkertainen ilmoitettuun 150W sallittuun jatkuvaan tehohäviöön nähden. On siis selvää ettei niitä voida mitata jatkuvalla virralla.

Suurivirtaisten tehopuolijohteiden mittaukseen käytetäänkin yleensä hyvin lyhyitä virtapulsseja, jotta mittaus voidaan suorittaa ilman että edes komponentin ytimen lämpötilan ehtii merkittävästi nousta. Mitä lyhyempiä pulsseja käytetään, sitä vähemmän komponentin lämpötilaan vaikutetaan. Tämä puolestaan johtaa tarkempiin tuloksiin. [8]

Kuvassa 27 on esitetty eräs järjestely FETin johtotilan resistanssin mittaamiseksi. Aktiivisella kuormalla aiheutetaan mitattavan komponentin läpi kulkeva kapea virtapulssi, kestoltaan alle sadasta mikrosekunnista muutamaan sataan mikrosekuntiin. Lyhyellä pulssilla testattavan komponentin ytimen lämpötilan kohoaminen saattaa jäädä jopa alle yhden asteen, joten se ei merkittävästi vaikuta mittaustuloksiin. Pulssin aikana mitataan testattavan komponentin yli jäävää jännitettä, jolloin johtotilan resistanssi voidaan laskea suoraan Ohmin lakia käyttäen. Kyseisessä järjestelyssä teholähteen rinnalle on lisätty kondensaattori riittävän pulssivirran takaamiseksi. [8]



Kuva 27: FETin testausjärjestely

Samaa testausjärjestelyä voidaan käyttää myös esimerkiksi FETin transkonduktanssin mittaamiseen. Sitä mitatessa aktiivinen kuorma asetetaan antamaan virtapulsseja, joiden suuruudeksi säädetään hieman enemmän kuin mitä testattavan komponentin läpi saadaan kulkemaan. Näin testattava komponentti jää virtaa rajoittavaksi elementiksi, aktiivinen kuorma vain huolehtii pulssituksesta. Hilajännitettä säädetään kunnes saadaan jäämään haluttu jännite johtotilassa olevan FETin ylitse. Samalla mitataan edellisten jännitteiden lisäksi FETin läpi kulkeva virta. Mittaus tehdään kahdessa pisteessä, haluttu arvon molemmiin puolin, jolloin tulos voidaan laskea kaavalla 16.

$$g_{fs} = \frac{I_{d2} - I_{d1}}{V_{g2} - V_{g1}} \quad (\text{Kaava 16})$$

## 4. Kaupallisia laitteita

Tarkastellaan muutaman kaupallisen laitteen ominaisuuksia lyhyesti. Tämän kappaleen aikana tarkasteltavista laitteista käytetään termiä elektroninen kuorma. Tarkoitus ei ole vertailla laitteita keskenään tai asettaa niitä mihinkään järjestykseen, ainoastaan yleisellä tasolla hahmotella niiden ominaisuuksia. Käsiteltäviin laitteisiin on valittu teholuokaltaan, ominaisuuksiltaan ja rakenteeltaan vaihtelevia laitteita, jotta kokonaiskuva elektronisista kuormista muodostuisi laajaksi.

### 4.1 Chroma ATE : 63101A

Chroman 6310A-sarjasta löytyy elektronisia kuormia 100W lähtien, 1200W asti. Laitteen rakenne on modulaarinen, laiterunkoon voidaan liittää yhdestä neljään yksi- tai kaksikanavaista kuormamoduulia. Laiterunkoon on kiinteästi asennettu ohjausyksikkö, jolla moduulit saadaan toimimaan yhtenä kokonaisuutena. Osaksi suurempaa testausjärjestelmää laite voidaan liittää USB-, GPIB- tai RS232-liitännällä. Kuvassa 28 näkyvä 6310A-sarja onkin suunnattu vaativampaan käyttöön tuotekehitykseen tai tuotannon testaukseen. [9]



Kuva 28: Chroma 6310A-sarja

Lähempään tarkasteluun 6310A-sarjasta on valittu yksikanavainen 200W kuormamoduuli 63101A. Kuormamoduuli kestää 80V jännitteen ja kykenee ohjaamaan 40A virtaa. Toimintamuodoista löytyvät vakiovirta, vakioresistanssi, vakiojännite ja vakioteho. Lisäksi laitteessa on dynaaminen toimintatila, jossa kuormavirtaa vaihtelee pulssimaisesti kahden asetetun tason välillä. Kuormamoduuli kykenee myös mittaamaan virtaa, jännitettä ja tehoa.

Käytettäessä vakiovirtaa tai vakiotehoa voidaan niitä säätää kuormamoduulin rajoitusten puitteissa. Vakiovirralla säädön resoluutio on 10mA ja vakioteholla 50mW. Kummallakin toimintamuodolla voidaan kuormamoduulia käyttää 20W tai 200W tilassa, joissa ensimmäisessä säätöresoluutio on 1mA tai 5mW. Myös vakioresistanssilla on kaksi aluetta joista yhdessä se kestää normaalin 80V jännitteen ja toisessa 16V. 80V alueella resistanssi on säädettävissä välillä 1,875 $\Omega$ -7,5k $\Omega$  ja 16V alueella 0,0375-150 $\Omega$ . Resistanssin säätö suoritetaan 12 bitin resoluutiolla.

Dynaamisessa toimintamuodossa kuormamoduulia käytetään vakiovirtamuodossa. Kuormitustasojen kestoajkojen säädössä voidaan valita kolmesta alueesta, joista hienoimmalla säätöalue on 0,025-50ms sekä karkeimmalla 10ms-50s. Kuormituksen vaihtelun suurimmaksi taajuudeksi saadaan näin ollen 20kHz. Virran nousu- ja laskunopeutta tasojen välillä voidaan myös säätää 6,4-1600mA/ $\mu$ s välillä. Kyetäkseen pitämään kuormavirran maksimiarvossaan 40A, on kuorma yli oltava vähintään 0,8V jännite. Jos kuorman yli oleva jännite halutaan pienemmäksi, ei voida käyttää maksimivirtaa.

Tämän luokan laitteille valmistajat ja jälleenmyyjät eivät aina ilmoita suoraan hintoja. Voidaan kuitenkin sivistyneesti arvioida pienemmän kaksipaikkaisen rungon kuormamoduuleineen maksavan joitain tuhansia euroja.

## 4.2 Agilent : N3302A

Myös Agilentin N3300A-sarja on rakenteeltaan modulaarinen, yhteen laiterunkoon voidaan asentaa yhdestä kuuteen kuormamoduulia. Moduleja on saatavissa 150-600W tehoisina. Laite on rakenteensa ja käytettävyytensä osalta tarkoitettu enemmänkin kiinteäksi osaksi suurempaa testausjärjestelmää, ei niinkään liikuteltavaksi testilaitteeksi. Laite on esitetty kuvassa 29. Hintaluokan voidaan arvioida olevan sama, kuin edellä esitetyn Chroman 6310A-sarjan.

Tarkasteltavaksi kuormamoduuliksi on valittu 150W versio, N3302A. Se kestää 60V jännitteen ja kykenee ohjaamaan 30A virtaa. Toimintamuodoista löytyvät vakiovirta, vakioresistanssi ja vakiojännite. Kuormamoduuli voi toimia myös dynaamisessa toimintatilassa. Laitteesta löytyvät myös tavallista paremmat mittaussominaisuudet jännitteen, virran ja tehon mittaukseen. [10]



Kuva 29: Agilent N3300A-sarja

Vakiovirralla voidaan käyttää 3A tai 30A aluetta, joita voidaan säätää 0,05mA ja 0,5mA resoluutioilla. Vakiojännitteellä arvot ovat 6V ja 60V alueilla 0,1mV ja 1mV. Vakioresistanssin käytössä on neljä aluetta, joilla kuormamoduulin resistanssia voidaan säätää välillä 0,067 $\Omega$ -2k $\Omega$ , resoluutiolla 0,07-70m $\Omega$ . Jotta kuormavirta pysyisi ilmoitetussa 30A maksimiarvossa, ei jännite kuorman yli saa laskea alle 1,2V. Kuitenkin annettulla jännitearvolla voidaan joutua jo tinkimään virran muutosnopeudesta.

Dynaamisessa toimintamuodossa laitetta voidaan käyttää missä tahansa perustointimuodossa. Kuormituspulssin kesto on säädettävissä 50 $\mu$ s ja 4s välillä, taajuusalueeksi ilmoitetaan 0,25Hz-10kHz. Virran nousu- ja laskunopeus on tietyin rajoituksin säädettävissä 500A/s ja 250kA/s välillä. Sisäisen transienttigeneraattorin lisäksi kuorman virtaa tai jännitettä voidaan ohjata ulkoisella 0-10V jännitesignaalilla.

#### 4.3 BK Precision : 8540

Tarkasteluun valittu BK Precisionin elektroninen kuorma on kuvan 30 mukaista mallia 8540. Edellisistä esitellyistä malleista poiketen, 8540 on hyvin pieni, kevyt ja yksinkertainen. Laitteessa on yksi 150W kanava, joka kestää 60V jännitteen ja voi ohjata 30A virtaa. Toimintamuodoista on toteutettu oleelliset. Vakiovirta, vakioresistanssi ja vakiojännite löytyvät, dynaamista toimintamuotoa ei ole. Laitteessa ei ole mitään ulkoista ohjausväylää, vaan se on tarkoitettu käytettäväksi manuaalisesti. Laitteessa on myös jännitteen, virran ja tehon mittausta. Laitteen on selkeästi edellistä vaatimattomampi, joten sen hinnaksikin muodostuu alle 500e. [11]





Kuva 30: BK Precision 8540

Vakiovirralla voidaan käyttää 3A tai 30A aluetta, joita voidaan säätää 1mA ja 10mA resoluutioilla. Vakiojännitteellä vastaavat arvot ovat 10V ja 60V alueilla 1mV ja 10mV. Vakioresistanssin käytössä on neljä aluetta. Pienimmällä alueella kuorman resistanssia voidaan säätää välillä 0,1 $\Omega$ -10 $\Omega$ , resoluutiolla 0,001 $\Omega$ . Suurimmalla alueella säätöväli on 1-4k $\Omega$  ja resoluutio 1 $\Omega$ . Valmistaja ei ilmoita, kuinka pieneksi kuorman yli oleva jännite saa laskea jotta pysytään ilmoitetussa maksimivirrassa 30A.

#### 4.4 TTi : LD300

Thurlby Thandarin valmistama elektroninen kuorma LD300 on myös kevyehkö, mutta ominaisuuksiltaan runsas pöytämallinen laite. Sen teho on 300W, suurin jännite 80V ja ohjattava virta enintään 80A. Toimintamuodoista löytyvät vakiovirta, vakioresistanssi, vakiokonduktanssi, vakiojännite ja vakioteho. Laitteessa on myös dynaaminen toimintatila. Laite on esitetty kuvassa 31, sen hintaluokka on hieman alle 1000 euron. [12]



Kuva 31: TTI LD300

Vakiovirralla on käytettävissä 8A ja 80A alueet, joilla virran voi asetella 1mA tai 10mA tarkkuudella. Vakiojännitteellä vastaavasti alueet ovat 6V ja 60V sekä resoluutiot 1mV ja 10mV. Vakioresistanssi on säädettävissä kahdella alueella. 0,04-10 $\Omega$  alueella kuorman resistanssia voidaan säätää 10m $\Omega$  resoluutiolla, 100 $\Omega$  alueella 100m $\Omega$ . Vakio-konduktanssi vastaa toiminnaltaan vakioresistanssia, mutta pienten resistanssien ilmoittaminen konduktanssina saattaa olla mielekkäämpää. Kuorman yli olevaksi minimijännitteeksi on ilmoitettu alle 2V, jos halutaan käyttää täyttä 80A virtaa. 40A virralla kuorman yli oleva jännite voi olla alle 1V.

Dynaamisessa toimintamuodossa laitetta voidaan käyttää missä tahansa perustointimuodossa. Sisäisellä transienttigeneraattorilla voidaan muodostaa taajuudeltaan 1,0Hz-10kHz signaalia, jonka pulssisuhde on säädettävissä. Myös virran nousu- ja las-  
kunopeus on säädettävissä 8mA/ms ja 2500A/ms välillä. Sisäisen transienttigeneraattorin lisäksi kuormaa voidaan ohjata ulkoisella analogisella jännitesignaalilla tai TTL-tasoisella digitaalisignaalilla.

## 5. Säädettävän kuorman suunnittelu ja toteutus

### 5.1 Yleistä suunnittelusta ja toteutuksesta

Suunnittelu ja toteutus on tässä työssä yhdistetty yhdeksi kokonaisuudeksi, jolloin laitteen toiminnallisten lohkojen mukaan tehty jako ei rikkoudu. Jokaisen toiminnallisen lohkon osalta käydään läpi siihen liittyvä suunnitteluprosessi ja tarkastellaan syntynyttä toteutusta.

Suunniteltavan ja toteutettavan laitteen katsottiin soveltuvan hyvin elektroniikan laitesuunnittelijan diplomityöksi, sillä se vastaa normaalia alan työtehtävää. Mikrokontrolleriohjatussa aktiivisessa kuormassa on sovellettava sekä digitaali- että analogiaelektroniikkaa, ja sovitettava ne saumattomasti yhteen. Aktiiviselle kuormalle valitut jännitteet, virrat ja nousunopeudet vaativat myös hyvää EMC-tuntemusta ja piirilevysuunnittelutaitoa. Koska kyseessä on sähköverkkoon liitettävä ja testausjärjestelmän tai -järjestelyn osana toimiva laite, on sitä suunniteltaessa tarkasteltava kokonaisuutta myös järjestelmätasolla.

Harvat laitteet koostuvat pelkästään elektroniikalla täytetystä piirilevystä. Useimmat laitteet vaativat ympärilleen mekaniikkaa, jotta niistä saadaan koottua toiminnallinen kokonaisuus. Joskus mekaniikkaa voi olla vain koteloinnin verran, toisinaan se saattaa muodostaa pääosan koko laitteesta. Siksi elektroniikkasuunnittelijan on tärkeää tietää ainakin perusteet mekaniikkaan liittyvästä suunnittelusta, materiaaleista ja työmenetelmistä. Elektroniikkasuunnittelijan on myös kyettävä työskentelemään tehokkaassa yhteistyössä mekaniikasta vastaavien suunnittelijoiden kanssa.

Huolella tehty piirilevy kauniissa kotelossa on kuitenkin vain kasa elotonta rautaa, jos mikrokontrollerit ja ohjelmoitavat logiikat eivät tee mitään. Elektroniikkasuunnittelijalla on myös oltava riittävät perustiedot ohjelmoinnista ja ohjelmistokehityksestä. On osattava valita oikea piiri kuhunkin sovellukseen, joten niiden ominaisuuksia ja suorituskkyä pitää kyetä arvioimaan sekä laitteiston että ohjelmiston kannalta. Tämän lisäksi on suunnitteluvaiheessa huomioitava esimerkiksi mikrokontrolleriin liitettävien oheispiirien- ja laitteiden vaatimukset, jotta ne toimisivat suunnitellulla tavalla. Elektroniikkasuunnittelijan on toimittava yhteistyössä myös ohjelmistosta vastaavien suunnittelijoiden kanssa.

Samat vaatimukset pätevät myös muihin suunniteltavaan laitteeseen liittyviin osalualueisiin. Elektroniikkasuunnittelijan on oman vastualueensa lisäksi jossain määrin ymmärrettävä muihin alueisiin liittyvät tekijät ja rajoitteet, sekä osattavat keskustella niistä vastaavien suunnittelijoiden ja asiantuntijoiden kanssa. Alihankintana tai tilaustyönä tehtävissä projekteissa sama ymmärrys pitää laajentaa koskemaan myös asiakasta. Kun suunnittelijalla on selkeä kuva suunniteltavasta kokonaisuudesta, hänen on helppompaa löytää oikeat ratkaisut.

Tässä työssä suunniteltu ja toteutettu aktiivinen kuorma sisältää elektroniikan lisäksi myös mekaniikkaa ja ohjelmistoa. Ilman mekaniikkaa suunniteltu laite toimisi äärimmäisen rajoitetusti, koska jäähdytys ei toimisi ja palaset lojuisivat suojaamattomina pöydällä. Toisaalta ilman mikrokontrollerin ohjelmistoa se ei myöskään tekisi mitään käyttäjän kannalta hyödyllistä. Voidaankin todeta, että työssä on elektroniikkasuunnittelun lisäksi tehty varsin kohtuullinen määrä myös mekaniikka- ja ohjelmistosuunnittelua.

## 5.2 Alustava määrittely

Aktiivisen kuorman suunnittelu aloitettiin alustavan määritelmän luomisella. Määrittely pohjautui arvioituun tarpeeseen käyttää aktiivista kuormaa pääasiassa teholähteiden testaukseen. Laitteelle asetetut vaatimukset pyrittiin myös suhteuttamaan tarkasteltujen kaupallisten ratkaisuiden ominaisuuksiin. Koska työhön käytettävissä olevat resurssit niin ajan kuin rahoituksenkin puolesta olivat rajalliset, pyrittiin pitäytymään yksinkertaisissa ja toimivissa ratkaisuissa.

Määrittelyä tehtäessä päädyttiin tilanteeseen, jossa määritellyn laitteen suunnittelija tekee itse määrittelyn omaan käyttöönsä tulevalle laitteelle. Joten alustavaa määrittelyä voi suunnittelun aikana muuttaa tarpeen tullen, se ei aiheuta vahinkoa tai epäsuoraa. Suunniteltaessa laitetta josta on tehty määrittely jonkin sovelluskohteen todellisten tarpeiden perusteella, ei voi aivan riskittä ottaa samankaltaisia vapauksia.

Aktiivisesta kuormasta päätettiin tehdä pääteasteeltaan yksipuoleinen, jolloin sen ei tarvitse pystyä syöttämään virtaa ulospäin. Näin laite saadaan toteutettua ilman järeää teholähdelohkoa. Määrittelyssä lähdettiin liikkeelle rajaamalla tarvittavat virta-, jännite- ja tehoalueet, sekä suhteuttamalla ne yleisesti saatavilla oleviin komponentteihin. Ensimmäisenä määriteltiin suurin tarvittu virrankesto, lähtökohtana mahdollinen tilanne jossa aktiivisella kuormalla testataan tietokoneissa yleisesti käytettyä ATX-teholähdettä. Nykyisellään ATX-teholähteiden kokonaisteho on 300-500W luokkaa, poikkeuksia tietysti on kumpaankin suuntaan. Yleensä suurin kyseisen tyyppisestä teholahteesta jatkuvasti saatava virta on noin 30A, joka löytyy +5V lähdöstä. Useimmat valmistajat eivät ilmoita arvoja joilla ylivirtasuojat toimivat, jotkut ilmoittavat rajaksi noin 40A. Jotta aktiivisen kuorman suurimpaan virrankestoön jäisi vielä hieman marginaalia, asetettiin alustavasti suurimman virrankeston arvoksi 50A.

Seuraavaksi pyrittiin kartoittamaan mahdollisia käyttötilanteita, joissa jännitteenkestoisuus näyttäisi merkittävää roolia. Virran arvon määrittämisen yhteydessä käytetty ATX-teholähde ei tässä aseta juurikaan vaatimuksia, sillä suurin siitä saatava jännite on 12V. Eräs mahdollinen tilanne on kuitenkin 24V lyijyakun kapasiteetin testaus, laitteen tulisi kestää akun suurin latausjännite joka on 27-28V tuntumassa. Tämän osalta 40V olisi riittävä. Oli kuitenkin otettava huomioon pieni mahdollisuus että aktiivista kuormaa pitäisi käyttää 48V teholahteiden testaukseen. Juurikaan sitä suurempia jännitteitä ei pienitehoisista tasajännitelähteistä yleisesti löydy, joten noin 60V kestävä aktiivinen kuorma selviäisi useimpien teholahteiden testauksesta.

Suurimmassa sallitussa tehohäviössä päätettiin noudattaa mallia, jossa teho ei ole suoraan suurimman jännitteen ja virran arvo. Suoraan edellä alustavasti määrittelyistä arvoista 50A ja 60V laskettuna tuo teho olisi 3000W. Tehorajaa tutkittaessa palattiin aiemmin esimerkkinä käytettyyn ATX-teholahteeseen. 5V lähdön suurin jatkuva virta tyypillisessä ATX-teholahteessa on 30A ja 12V lähdön noin 15A. Näistä arvoista päästään 5V osalta tehoon 150W ja 12V osalta 180W. Alustavasti aktiivisen kuorman tehonkeston tavoitteeksi asetettiin 200W. Kytkennän toteutuksen kannalta päädyttiin käyttämään säätöelementtinä transistoria, joita on yleisesti saatavilla valitut virta- ja jännitearvot ylittävinä. 200W tehonkestovaatimusta sen sijaan ei helposti kateta yhdellä komponentilla. Yhdeksi vaihtoehtoista jäi rajoittaa kokonaisteho 100W luokkaan, joka onnistuu yhdelläkin komponentilla. Toinen vaihtoehto oli käyttää rinnankytkentää, jolloin tehohäviö komponenttia kohden pysyisi pienempänä.

Aktiivisen kuorman pienimmän toimintajännitteen haluttiin olevan niin pieni, että sillä olisi mahdollista testata esimerkiksi modernien mikroprosessorien käyttöjännitteitä tai hyvin matalajännitteistä akkukennoa. Esimerkiksi jo hieman vanhemmassa Intelin Pentium 4 prosessorissa ytimen käyttöjännite on vielä arviolta 1,5-1,8V. Uudemmassa Pentium Core 2 Duossa päästään lukemiin 0,8-1,5V. Tämän pohjalta asetettiin tavoitteeksi, että täydellä kuormitusvirralla pienin toimintajännite olisi 1,0V ja osakuormalla tietysti pienempi.

Toteutettavan aktiivisen kuorman toimintamuodoissa tarpeellisimmiksi katsottiin vakiovirta ja vakioresistanssi. Vakiovirta on ehkäpä helpoin toteuttaa ja sille on eniten käyttöä. Vakioresistanssi tuo laitteen ominaisuuksiin mukavan lisän, joten se päätettiin ottaa mukaan. Koska aktiivisen kuorman suunnitteluun ja toteutukseen oli käytettävissä melko vähän aikaa, päätettiin vakiojännitteen ja vakiotehon toteutus jättää toistaiseksi pois. Vakiovirran asetusresoluutioksi 10mA katsottiin riittäväksi, jopa 100mA voisi tulla kyseeseen. Resistanssin osalta alue 0-100Ω katsottiin riittäväksi, suuremmalle resistanssille ei tässä yhteydessä havaittu tarvetta. Dynaaminen toimintamuoto on teholahteiden testauksen kannalta niin oleellinen, että laitteessa on oltava sellainen. Dynaaminen toimintamuoto päätettiin toteuttaa yksinkertaisessa muodossa, jossa voidaan määritellä kaksi virta-arvoa joiden välillä aktiivisen kuorman toimintapiste vaihtelee. Nousu- ja laskuajat tulisivat olemaan kiinteät, taajuus ja pulssisuhde kuitenkin säädettävät. Riittäväksi sisäisen transienttigeneraattorin tuottamaksi taajuudeksi päätettiin 20kHz.

Käyttöliittymän osalta ei tässä vaiheessa asetettu kovin tarkkoja vaatimuksia. Käyttöliittymän tulisi olla selkeä, helppokäyttöinen ja kohtuullisessa ajassa toteutettavissa. Koska osa käyttöliittymän toiminnoista on toteutettu mikrokontrollerilla, on niiden muokkaaminen ja hiominen jälkikäteen mahdollista. Alustavasti ensisijaiseksi käyttöliittymäksi hahmoteltiin painonapilla varustettu käänneltävää nuppia. Sen lisäksi havaittiin tarpeelliseksi erillinen painonappi jolla aktiivinen kuorma saadaan kytkettyä nopeasti päälle ja pois. Lisäksi laitteessa tulisi tietenkin olla käyttökytkin. Näytöksi valittiin normaali 16x2 merkin LCD-näyttö, koska se on hinnaltaan edullinen.

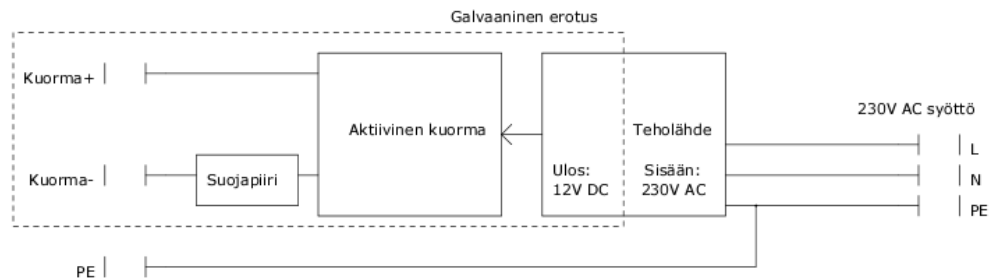
Laitteen fyysiselle koolle ei vielä asetettu rajoituksia. Laitteen fyysisiin mittoihin päätettiin paneutua tarkemmin, kunhan olisi saatu selville tarvittavan jäähdytyslementin koko, hinta ja saatavuus. Alustavasti päätettiin käyttää puhallinta jäähdytyksen tehostamiseen, koska 200W haihduttaminen passiivisesti vaatisi liian suuren ja kalliin jäähdytyslementin. Lisäksi tehokkaalla jäähdytyksellä haluttiin taata laitteelle paras mahdollinen suorituskyky. Aktiivisen kuorman tyypillisessä käyttöpaikassa puhaltimen aiheuttamaa pientä ääntäkään tuskin voi pitää kovin häiritsevänä.

Teholähteen suunnittelussa ja toteutuksessa päätettiin tyytyä vähemmän kiillotettuun lopputulokseen ja tehdä yksinkertainen teholähde perinteisellä muuntajalla ja lineaariregulaattoreilla. Vaihtoehtoksi jätettiin myös valmiin teholähdeyksikön käyttäminen. Tähän päädyttiin, koska teholähteelle asetetaan tässä kohteessa melko pieniä vaatimuksia, eikä sen suunnitteluun ja toteuttamiseen kannata käyttää liikaa aikaa. Teholähteestä tulisi saada ainakin +5V jännite mikrokontrollerille ja LCD-näytölle, sekä noin +/-15V analogielektroniikalle kuten operaatiovahvistimille. +15V riittäisi myös enemmän kuin hyvin useimpien FETtien ohjaukseen. +5V jännitteellä virtaa ei missään tapauksessa kuluisi yli 100mA, +15V jännitteellä tarvittavan virran määräisi lähinnä käytettävien FETtien johtotilaan ajettaessa tarvitsema virta.

Laitteen ylijännite ja ylivirtasuojauksen mahdollista toteutusta päätettiin tarkastella myöhemmin. Niitä ei tässä laitteessa pidetty aivan oleellisina, sillä mahdollisten käyttäjien katsottiin osaavan huomioida laitteelle asetetut rajoitukset. Sen sijaan päädyttiin alustavasti ratkaisuun jossa laitteen jäähdytyslementin lämpötilaa mitataan ja sen kasvaessa liian suureksi toiminta keskeytetään. Näin saadaan aikaan ylikuormitussuoja, jolla rajataan laitteelle ja käyttöympäristölle tapahtuvaa vahinkoa.

### 5.3 Suunnittelu järjestelmätasolla

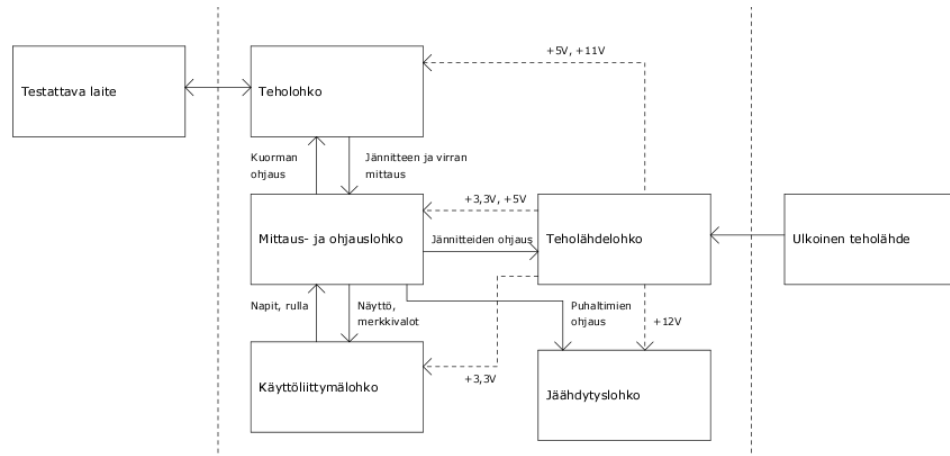
Tarkastellaan ensin laitteen suunnittelua ja toteutusta järjestelmätasolla, samalla tehden jakoa pienempiin toiminnallisiin lohkoihin. Järjestelmätasolla laite ilmenee kuvan 32 mukaisena lohkona, jollaisena se voidaan yhdistää osaksi testausjärjestelyä tai suurempaa testausjärjestelmää. Laite tarvitsee käyttöjännitteen, joka tässä tapauksessa on normaali saatavilla oleva verkkojännite. Muulle testauslaitteistolle laite näkyy säädettävänä resistanssina tai virtakuormana. Aktiivinen kuorma on sähköisesti kelluva, sen teholaähde on galvaanisesti erotettu verkosta. Kuorman voidaan antaa vapaasti kellua, kunhan sen nollapotentiaali pysyy tietyissä rajoissa maapotentiaaliin nähden. Haluttaessa toinen kuorman navoista voidaan maadoittaa. Kuvassa näkyvä suojapiiri koostuu 60A sulakkeesta, joka on asennettu kiinteästi aktiivisen kuorman laitekoteloon.



Kuva 32: Aktiivinen kuorma järjestelmätasolla

Laite on suunniteltaessa jaettu toiminnallisiin lohkoihin, jotka on esitetty kuvassa 33. Laitteen jakaminen lohkoihin paitsi selkeyttää suunnittelua, myös tekee laitteen muille tarkastelijoille helpommin lähestyttäväksi. Mahdollisessa vikatilanteessa tai tuotekehityksen vaatimassa testauksessa lohkoja voidaan väliaikaisesti erottaa toisistaan tai korvata muilla toteutuksilla. Myös tarpeetonta suunnittelutyötä voidaan vähentää, kun hyväksi todettuja lohkoja voidaan hyödyntää useammassa laitteessa. Vaikka lohkoja ei voisikaan piirilevyiltä fyysisesti erottaa toisistaan, ne voivat silti olla luonteeltaan modulaarisia.

Teholohko on laitteen keskeisimpiä lohkoja ja määrittää melko pitkälle laitteen suorituskyvyn. Siihen kuuluu kuorman läpi kulkevaa virtaa säätelevä kytkentä oheiskomponentteineen. Lohkojen toiminnot menevät jonkin verran päällekkäin, koska muutoin jouduttaisiin tarpeettomasti toteuttamaan sama toiminto useaan kertaan eri lohkoissa. Tässä toteutuksessa mittaus- ja ohjauslohko käyttää virran mittaamiseen tehlohkossa sijaitsevaa mittauspiiriä.



Kuva 33: Aktiivisen kuorman lohkokaavio

Jo mainittu mittaus- ja ohjauslohko mittaa tehlohkon ylitse vaikuttavaa jännitettä ja sen läpi kulkevaa virtaa. Lisäksi mitataan laitteen jäähdytyslementin lämpötilaa. Tähän lohkoon kuuluu vain vähän osia, sillä suurin osa sen toiminnoista toteutetaan muiden lohkojen osilla. Laitteen mikrokontrollerin voidaan katsoa kuuluvaksi tähän lohkoon, koska se mittaa ja ohjaa toimintoja.

Teholähde muodostaa oman selkeän lohkonsa. Se koostuu verkkojännitteeseen kytkevästä pääteholähteestä ja useasta sen syöttämästä regulaattorista. Mittaus- ja ohjauslohko kykenee ohjaamaan osaa regulaattoreista päälle tai pois, näin halliten käyttöjännitteiden kytkeytymisjärjestystä.

Käyttöliittymälohko huolehtii kommunikaatiosta laitteen käyttäjän kanssa. Se koostuu syötettä lukevista napeista ja käyttäjälle tietoa antavasta näytöstä. Vaikka se vaikuttaa yksinkertaiselta, sen merkitystä ei tule väheksyä. Suuri osa käyttäjälle mieleen jäävästä käyttökokemuksesta pohjautuu käyttöliittymän toimintaan. Jos käyttöliittymä ei toimi jouhevasti ja loogisesti, saattaa se nostaa kynnystä laitteen käyttöön.

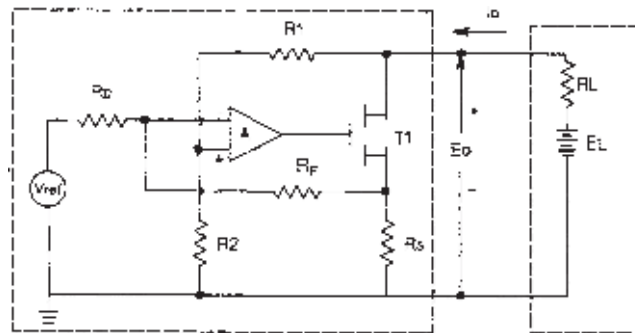
Jäljelle jää vielä jäähdytyslohko, joka ainoastaan ohjaa mittaus- ja ohjauslohkolta saadun tiedon mukaan laitteen puhaltimia. Turvallisen matalissa lämpötiloissa puhaltimia on varsin turha käyttää täydellä teholla, joten kierroksia lasketaan hieman käyttömukavuuden ja kestävyysden vuoksi.



## 5.4 Lohkojen suunnittelu ja toteutus

### 5.4.1 Teholohko

Erityisesti tehlohkon suunnittelussa on käytetty apuna muutamaa lähdeluettelossa mainittua teosta. Puolijohdekomponenttien kytkentöjen analysoinnissa käytettiin Linden Harrisonin teosta Current sources & voltage references [3], sekä Richien teosta Transistor circuit techniques [4]. Kuvan 34 mukainen, suunnittelun alkuvaiheessa esimerkkinä käytetty kytkentä on Clyde F. Coombsin teoksesta Electronic instrument handbook [5].



Kuva 34: Yksinkertainen aktiivinen kuorma.

Kuvan 34 kytkentä on erittäin yksinkertainen, mutta toimii silti pienin muutoksin vakiovirtakuormana, vakiojännitekuormana tai vakioresistanssikuormana. Kytkennästä ei tässä yhteydessä esitetä kaavoja tai suoriteta lähempää tarkastelua, sillä se on jo tehty alkuperäisessä lähdeteoksessa. Työn alkuvaiheessa yritettiin tehdä vastaavanlaista kytkentää jossa kaikki takaisinkytkentä on tehty analogisesti, mutta kuitenkin niin että ohjaus voidaan toteuttaa mikrokontrollerilla.

Tulokset eivät olleet kovinkaan lupaavia, ainakaan kovin suurella säätöalueella. Säätöelementtinä käytettiin jännitelähdettä ja säädettävää resistanssia, jotka todellisessa kytkennässä olisi voitu korvata DA-muuntimella ja digitaalisella potentiometrillä. Digitaalisten potentiometriä kaistanleveys kytkennän vaatimilla suurilla vastusarvoilla on kuitenkin alhainen, eikä niiden absoluuttinen tarkkuuskaan ole hyvä. Niiden käyttöaikaista luovuttiin, ja keskityttiin DA-muuntimien antamiin mahdollisuuksiin. Simulaatiossa saatiinkin toimimaan useamman toimintamuodon aktiivinen kuorma jota ohjataan DA-muuntimella ja analogiakytkimillä. Sen toiminta ei kuitenkaan vakuuttanut, eikä haluttujen ominaisuuksien välille löydetty onnistunutta tasapainoa. Lisäksi resistanssin ohjauksesta saatiin aina luonteeltaan logaritminen, joka olisi syönyt käytettävissä olevaa säätöresoluutiota.

Pitkään kestäneen simuloinnin ja kehittelyn jälkeen päätettiin jättää ainoastaan virran takaisinkytkentä analogiseksi, ja tehdä pääteasteesta vain virtakuorma. Muut toimintamuodot ja niiden vaatimat takaisinkytkennät päätettiin toteuttaa mikrokontrollerin avulla. Koska pääteasteen rakenne oli ennestäänkin yksinkertaistunut, päätettiin myös pudottaa analogiakytkennöiltä pois negatiiviset käyttöjännitteet ja toteuttaa koko laite useammalla yksipuoleisella käyttöjännitteellä. Kun käytettävä kytkentä oli hahmoteltu, suunnittelua jatkettiin etsimällä sopivaa tehopuolijohdetta. Etsintä päätettiin rajata BJT- ja MOSFET-transistoreihin, koska niitä voidaan helposti käyttää lineaarisella alueella. Lisäksi niitä on erittäin hyvin saatavilla ja hinnat ovat alhaisia. Myös alustavassa määrittelyssä esiin nousseet virta- ja jännitearvot vaikuttivat hyvin järkeviltä kyseisille komponenteille.

BJT:t ovat usein tarkoitettu käytettäväksi juuri lineaarisella alueella, ellei sitten kyseessä ole kytkinkäyttöön optimoitu transistori. BJT:lle ominaista on myös sen soveltuvuus käytettäväksi korkeaimpedanssisena virtakuormana, johtuen lineaarisuuden tuomasta laajemmasta käyttöalueesta. BJT:n ongelma tässä käytössä kuitenkin voi olla sen pienin kollektori-emitteri-jännite mikä sillä voidaan saavuttaa suuremmalla virralla ajamatta transistoria saturaatioon. Juuri BJT:n saturoituminen suurella virralla ja pienellä jännitteellä oli yksi syy sen hylkäämiseen.

MOSFETit ovat nykyään enimmäkseen kytkinkäyttöön tehtyjä, joten niiden lineaarisen alueen ominaisuudet eivät ole niin hyviä kuin BJT:llä. Datalehdissä esitetyt arvot pätevät usein vain kytkinkäytössä, eikä osa komponenteista esimerkiksi kestä lineaarisella alueellaan sille ilmoitettua suurinta tehohäviötä. Myös lineaariselle alueelle tarkoitettuja komponentteja on saatavilla, mutta niiden hinta on tavallisia korkeampi. MOSFETin ohjauspiiri on kuitenkin huomattavasti yksinkertaisempi kuin BJT:n, koska se ei vaatii hyvin vähän virtaa. Eräs hyvä ominaisuus MOSFETissa on sillä saavutettava hyvin pieni nielun ja lähteen välinen jännite suurillakin virroilla.

Näistä kahdesta vaihtoehdosta päädyttiin käyttämään MOSFETtia, koska sillä yksinkertaisesti on suoritettavan tehtävän kannalta enemmän hyviä kuin huonoja puolia. Lisäksi MOSFETtien rinnankytkentä on helppoa, koska niiden vahvistuksen negatiivinen lämpötilakerroin pyrkii luonnostaan tasaamaan virtaa rinnan kytkettyjen komponenttien välillä. Prosessia jatkettiin sopivaa MOSFETtia etsimällä. Tähän käyttötarkoitukseen soveltuu N-kanavainen avaustyyppinen komponentti, joka on yleisin saatavilla oleva MOSFET-tyyppi. Jotta saavutettaisiin kuorman maksimijännite 60V, tulisi komponentin kestää tietenkin enemmän jännitettä. Komponentti suojataan kytkennässä ylijännitesuojalla, joka osaltaan vaikuttaa valittavan komponentin jännitekeston. Tyypillinen puolijohdetekniikalla toteutettu 60V ylijännitesuoja rajoittaa jännitteen hieman alle sataan volttiin, joten 100V jännitekestoinen komponentti on riittävä.

Virtakestoisuutta ei voitu suoraan määritellä, sillä se riippuu siitä montako komponenttia toteutuksessa kytketään rinnakkain. Samalla tavalla pienemmistä osuuksista koostuu suurin tehonkesto. Arvioitiin rinnan kytkettävien komponenttien määräksi noin kahdesta kymmeneen kappaletta. Karkealla arviolla päästiin virran arvoon 5-25A ja tehossa 30-150W luokkaan. On kuitenkin tärkeää huomioida, että komponenttien on toteutettava kyseiset arvot korkeimmassa mahdollisessa käyttölämpötilassaan. Datalehtien etusivuilla mainostetut arvot on yleensä mitattu noin 25°C lämpötilassa hyvin lyhyillä pulsseilla.

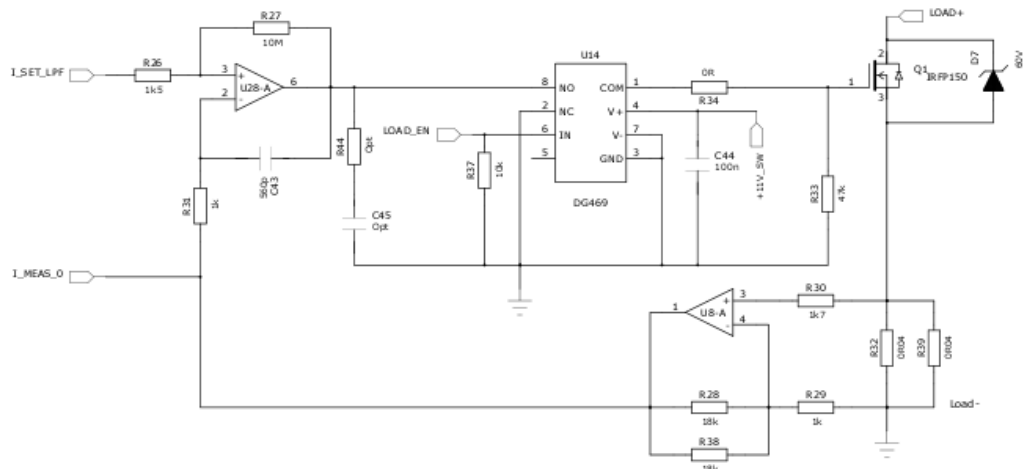
Sopivia komponentteja löytyi runsaasti, ja yksinkertaistetun tehlohkon kytkentää simuloitiin Pspice-piirisimulaattorilla. Simulaatio varmisti erään MOSFETteihin liittyvän asian, jonka olemassaolo oli kyllä jo tiedostettu mutta sitä ei oltu vielä tarkasteltu lähemmin. Kytkinkäyttöön tarkoitettulla komponentilla on tarkoitus ohjata suurta virtaa, kymmeniä tai satoja ampeereja. Kuitenkin sen ohjaamiseen tarvittava jännite pyritään pitämään pienenä, monilla jo 5V ohjausjännitteellä saadaan kanava lähes täysin auki. Toisin sanoen lineaarinen alue on pyritty minimoimaan, jotta kytkinkäytössä päästäisiin pieniin häviöihin. Tällaisen MOSFETin transkonduktanssi on suuri, joka johtaa herkemmin epästabiiliin säätöön käytetyllä rakenteella. Etsittävän MOSFETin määritelmää voitiin siis tarkentaa, haluttava ominaisuus olisi pieni transkonduktanssi joka olisi saavutettavissa kun valitaan komponentti jonka virrankesto on suhteellisen pieni ja vaadittava ohjausjännite suuri.

Vahvaksi ehdokkaaksi nousi valmistajan ilmoittamien ominaisuuksien ja saatujen simulointitulosten perusteella IRFP150. Sen jännitekesto on 100V, virrankesto 40A ja suurin sallittu tehohäviö 180W olivat sopivalla alueella, lisäksi TO-247 kotelo mahdollisti tukevan kiinnityksen jäähdytyslementtiin. Komponentti on jo varsin iäkäs, mutta edelleen käyttökelpoinen ja aktiivisesti valmistuksessa. Komponentin kotelon lämpötilan ollessa 100°C se kykenee vielä ohjaamaan hieman yli 25A virtaa, mikä on riittävästi. Samaisessa 100°C lämpötilassa se kestää tehohäviötä vielä 70W. Virran arvoilla 0-25A transkonduktanssi pysyy alle kahdenkymmenen, kun se huonommin tehtävään soveltuvalla komponentilla saattaa olla lähempänä sataa.

Alustavassa määrittelyssä kaavailtiin tehlohkon kykenevän nielemään täyden määritellyn virran vielä 1,0V jännitteellä. IRFP150 datalehdeltä voidaan nähdä komponentin ohjaavan vielä noin 15A virtaa kun  $V_{ds}$  on pudonnut 0,5 volttiin. Edellisiin arvoihin päästään hilajännitteellä 8V, sen nostaminen 10V arvoon ei enää oleellisesti muuta mitään. Kun MOSFETin yli jäävään 0,5V jännitteeseen lisätään vielä virranmittausvastuksen pieni jännitehäviö, tulos jää alle 1 voltin. Kun jätetään sopivasti varmuusvaraa, voidaan todeta että kyseisessä sovelluksessa yhdellä IRFP150:lla kannattaa käsitellä noin 10A virtaa.

Edellisestä päätelmästä voidaankin johtaa rinnan kytkettävien komponenttien määrä. Komponenttien määräksi päätettiin 6, jolloin päästää tavoitearvoihin ja jopa ylitetään ne tehonkeston osalta. Samalla päätettiin myös antaa jokaiselle oma virranmittaus ja ohjauspiiri. Tähän päädyttiin useastakin syystä, yksi niistä on mittausvastuksessa syntyvä tehohäviö joka 60A virralla nousisi epämukavan korkeaksi käytettäessä yhtä vastusta. Toinen syy on MOSFETien suoran rinnankytkennän aiheuttama suuri kapasitiivinen kuorma ohjauspiirille. Katsottiin järkevämmäksi tehdä useampi pieni ohjauspiiri. Eräs tätä toteutustapaa puoltava asia on modulaarisuus, itsenäisiä virranohjausyksiköitä voidaan laitteeseen tehdä juuri niin monta kuin tarve vaatii.

Kun tehokomponentti oli valittu, päästiin jatkamaan laskelmia ja simulaatioita pääteasteen osalta. Pääteasteessa harkittiin toteutuksia jossa virranmittausvastusten yli jäävää vertailujännitettä vahvistettiin operaatiovahvistimella ja vastaavasti toisia joissa pieni jännite johdettiin suoraan pääteastetta ohjaavaan operaatiovahvistimeen. Kun kuormavirtaan aiheutetaan suuria muutoksia nopeasti, on yhden operaatiovahvistimen kytkentä stabiilimpi ja aiheuttaa vähemmän värähtely tilan vaihtuessa. Kuitenkin haluttiin että mikrokontrollerilta tuleva asetussignaali on jännitetasoltaan mahdollisimman suuri jotta siihen kytkeytyvät häiriöt haittaavat vähemmän. Simulaatioissa päädyttiin tulokseen, että yhden operaatiovahvistimen mallissa asetus- ja vertailujännitteiden ollessa eri kokoluokkaa, kytkentä ei toiminut tyydyttävästi kaikissa ääritilanteissa. Joten päätettiin käyttää toista operaatiovahvistinta nostamaan virranmittauksesta saatavaa vertailujännitettä, sillä se jouduttaisiin joka tapauksessa nostamaan ennen mittaus- ja ohjauslohkon AD-muuntimelle syöttöä. Toinen vaihtoehto yhden operaatiovahvistimen mallilla olisi ollut nostaa virranmittausvastuksen arvoa, mutta se ei ollut toteutuskelpoinen. Pääteasteen toteutuksessa päädyttiin lopulta kuvan 35 mukaiseen kytkentään. Kuvassa on esitetty yksi kuudesta pääteasteesta, jotka ovat kaikki identtisiä.



Kuva 35: Pääteaste

Pääteasteen virta kulkee virranmittausvastusten R32 ja R39 läpi, jossa sen aiheuttaman jännitehäviön perusteella voidaan laskea virran arvo. Operaatiovahvistin alhaalla oikealla vahvistaa virranmittausvastusten yli jäävän jännitteen 10-kertaiseksi. Mitä suuremmaksi vahvistuksen nostaa, sitä hitaammaksi takaisinkytkentä tulee ja aiheuttaa ongelmia kytkennän transienttivasteessa. Virranmittausvastuksen kokonaisvastukseksi päätettiin 0,02R, joka vahvistettuna 10-kertaiseksi on AD-muuntimelle hyvin soveltuva 2,0V. Vastusarvoon 0,02R päädyttiin myös siksi, että sillä 10A virran aiheuttama tehohäviö on vain 2W. Kalliin virranmittaukseen tehdyn erikoisvastuksen sijaan päätettiin käyttää kahta halpaa 0,04R arvoista 1% tarkkuuksista normaalia vastusta. Valmistajasta ja vastuksesta riippuen 2512-koteloinen vastus kestää 2-3W tehohäviön, joten rinnankytkennän tehonkesto on 2-3 kertainen maksimihäviöön verrattuna. Vastusten jäähdytys hoidetaan liittämällä toinen pää suureen kuparialueeseen joka johtaa lämpöä tehokkaasti pois.

Operaatiovahvistimeksi virranmittaukseen tarvittiin hieman ristiriitaisilla vaatimuksilla varustettu komponentti halvalla. Kuten monesti, tehtäväksi jäi löytää kaikista epäideaalisista komponenteista vähiten huono. Operaatiovahvistimella mitataan 0-200mV jännitettä, joten sen sisääntulon offset ei saisi olla suuri. Samalla sen pitäisi olla kuitenkin huomattavan nopea, koska se on kytkennässä takaisinkytkentäsilmaan sisällä. Samanaikaisesti oli päätetty kokonaisuuden yksinkertaistamiseksi luopua kaksipuoleisesta käyttöjännitteestä, joten operaatiovahvistimetkin oli valittava sen mukaan. Yksipuoleisen operaatiovahvistimen tulostulon tulisi ohjautua ainakin negatiiviseen käyttöjännitteeseen saakka, positiivinen voidaan hoitaa mitoittamalla käyttöjännite hieman suuremmaksi. Tarkan ja pitkällisen vertailun jälkeen päädyttiin Analog Devicesin kaksikkooperaatiovahvistimeen AD8602, joka myöhemmin vaihdettiin yksikkömalliin AD8601 saatavuusongelmien vuoksi. A-tyypin AD8601:n toimii yksipuoleisella 2,7V-5,5V käyttöjännitteellä, ajaa ulostulonsa laidasta laitaan. Sisääntulon offset-jännite on enintään 500uV. Kuitenkin sille luvataan myös 5V/us ulostulon nousu- ja laskunopeus sekä 8MHz kaistanleveys. Lisäksi se on stabiili vahvistuksen ollessa yksi, joten sitä voi käyttää esimerkiksi puskurivahvistimena muualla laitteessa. Käyttöjännitteeksi kyseiselle operaatiovahvistimelle valittiin 5V, jolle oli havaittu tarvetta muuallakin laitteessa.

Edellisessä kuvassa ylhäällä vasemmalla oleva operaatiovahvistin vertailee virran asetusarvoa mittausvahvistimelta saatavaan vertailuarvoon ja ohjaa pääteasteen teho-komponenttia pitääkseen edellä mainitut arvot yhtenevinä. Operaatiovahvistimen havaittiin jo simulaatiossa tarvitsevan kompensointia, enemmän tai vähemmän riippuen käytetystä tehokomponentista, virranmittausvahvistimesta ja tietenkin operaatiovahvistimen tyypistä. Käytetyillä komponenteilla simulaation mukaan sopiva kompensointikondensaattorin arvo olisi ollut jotain 0,5nF ja 10nF välillä, riippuen siitä pyrkikö optimoimaan vakaan tilan virtariippelin vai transienttivasteen piikityksen. Lopullinen arvo päätettiin valita vasta todellista fyysistä kytkentää mitatessa, jolloin kaikki parasitiiviset elementit olisivat läsnä. Mittausten perusteella valittiin kondensaattorin arvoksi 22nF, jolla vakaan tilan virtariipeli on tarpeeksi pieni.

Kytkenässä oleva vastus R27 ei tässä kytkennässä oikeastaan tee mitään. Se jäi pääteasteeseen epähuomiossa, koska samaa pääteastetta simuloitiin useilla eri ohjaustavoilla joista jokin hyödynsi kyseistä vastusta. Vastuksen unohtuminen paikalleen huomattiin niin myöhäisessä vaiheessa, ettei sitä enää lähdetty poistamaan.

Mutta mitä vakaammaksi kytkennän kompensoi, sitä huonomman vasteen se antaa transienttitilanteessa kun virran asetusarvoa nopeasti muutetaan. Kytkenässä on lisäksi paikat R44 ja C45 muodostamalla snubberille, joskaan sitä ei ole otettu käyttöön. MOSFETin hilavastuksen R34 arvosta ei päästy simulaation, laskelmien tai kytkentäesimerkkien avulla päätökseen. Pieni hilavastus antoi piirille nopeamman vasteen, mutta saattoi joissain tapauksissa aiheuttaa epästabiiliutta. Toisaalta liian suuri hilavastus vaikutti johtavan suorituskyvyn laskuun ja epästabiiliuteen toisissa tilanteissa. Vastus päätettiin alustavassa kytkennässä korvata 0R vastuksella ja mitata kytkennän käyttäytymistä eri vastuksen arvoilla. Mittausten perusteella päädyttiin 470R hilavastukseen edellä mainitulla kompensointikondensaattorin arvolla.

Toiseksi operaatiovahvistimeksi ei voitu käyttää AD8601:ta jo siitäkin syystä, että sen ulostulosta halutaan MOSFETille ohjausjännite joka on suurempi kuin AD8601:n suurin sallittu käyttöjännite. Paikalle löytyikin saman valmistajan kaksikkovahvistin OP262, joka myös toimitusvaikeuksien vuoksi vaihdettiin yksikkömalliin OP162. Sen käyttöjännitealue on 2,7-12V, sisääntulon offset-jännite enintään 325uV, kaistanleveys 15MHz ja nousu- sekä laskunopeus 13V/us. Lisäksi se kykenee antamaan jatkuvasti +/-30mA virtaa ja sietää myös kapasitiivista kuormaa. Yhden OP161:n hinnalla kuitenkin saa kolme AD8601:ta, joten halvempien operaatiovahvistimien käyttö on edelleen perusteltua siinä mihin ne käyvät.

Pääteasteen kytkennästä löytyvä U14 on analogiakytkin, jonka tehtävänä on kytkeä MOSFETin ohjaus päälle tai pois. Päälle kytkettynä se yhdistää operaatiovahvistimen ulostulon MOSFETiin hilavastuksen kautta. Pois kytkettynä MOSFETin hila vedetään samaisen vastuksen kautta maahan, jotta se ei johda. Lisäksi hila on maadoitettu vastuksella R33, joka varmistaa ettei pääteasteen läpi kulje virtaa käynnistys- tai sammutus- hetkellä eikä vikatilanteessa jos +11V käyttöjännite puuttuu. Käynnistys- ja sammutus- tilanteissa on pyritty usealla päällekkäisellä toimenpiteellä estämään virran tahaton kulku pääteasteessa. Laitteen käynnistyessä operaatiovahvistinten ja analogiakytkimen +5V ja +11V käyttöjännitteitä ei ole kytketty. Käynnistyksessä asetetaan ensin virran asetussignaali nollaan jonka jälkeen käynnistetään +5V regulaattori, näin saadaan operaatiovahvistin U8 käyntiin ja U28 sisääntulosignaalit oikeiksi. Seuraavaksi käynnistetään +11V regulaattori ja sitä myöden operaatiovahvistin U18 ja analogiakytkin. Vaikka U28 käynnistyessään antaisi jonkin piikin ulostuloonsa, se ei haittaa sillä kytkin ei päästä sitä MOSFETille asti. Vasta haluttaessa aktivoida pääteaste, muutetaan kytkimen tilaa ja valitun suuruinen virta alkaa kulkea pääteasteessa. Myös kytkimen ohjaustulossa on alasetovastus varmistuksena.

Teholohko koostuu 6 kappaleesta esitetyn kaltaisia pääteasteita. Virran asetussignaali on kaikille sama, ja jokaisen virran vertailuarvoa luetaan erikseen mittaus- ja ohjauslohkon mikrokontrollerilla. Näin voidaan toteuttaa ylivirtasuojia, sekä havaita jos jonkin pääteasteen toiminta on muutoin poikkeavaa. Toisena ylivirtasuojana toimii laitteeseen asennettu 60A sulake, joka vikatilanteessa palaa poikki. Ylijännitesuojauksesta huolehditaan samanlaisilla 60V ylijännitesuojilla, joita käytetään MOSFETtien suojaukseen. Ylijännitesuojaus on kytketty suoraan kuormaliittimien viereen. Ylijännitesuojien ottaman pidemmän virtapiikin tulisi myös polttaa 60A sulake. Haluttaessa ylijännitetilanteessa voitaisiin suojautua myös ajamalla pääteasteet täysille, jolloin jännitteen tulisi laskea.

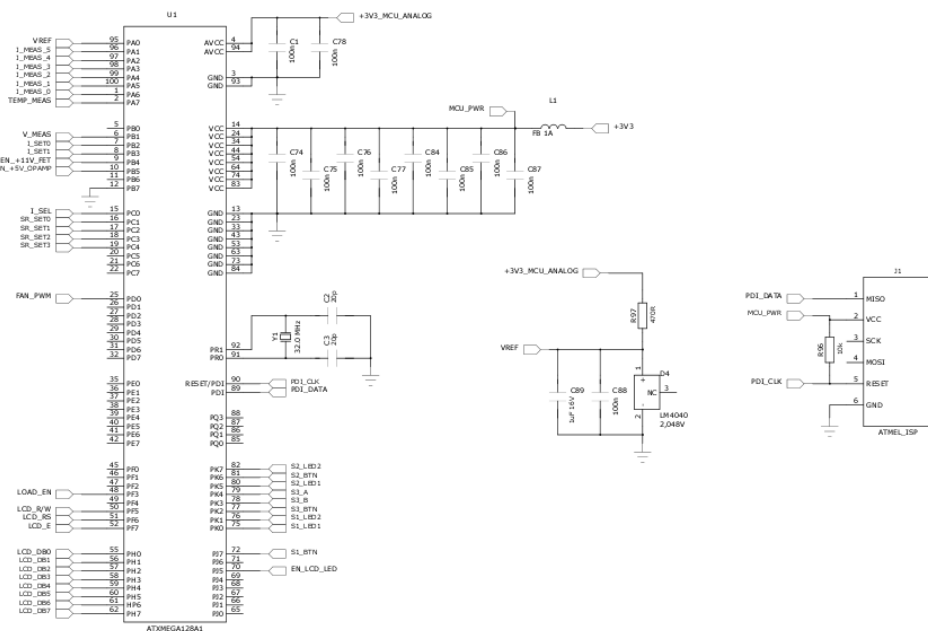
#### 5.4.2 Mittaus- ja ohjauslohko

Ohjaus- ja mittauslohkon suunnittelu aloitettiin selvittämällä kytkentään tulevalta mikrokontrollerilta ja AD- sekä DA-muuntimilta vaadittavat ominaisuudet. Jos tultaisiin toteuttamaan pelkästään aktiivinen virtakuorma, mikrokontrollerin tehtäväksi jäisi lähinnä pyörittää käyttöliittymää ja päivittää käyttäjän muuttamaa virran asetusarvoa. Tällaiseen tehtävään vaikkapa 8MHz taajuudella toimiva pieni 8-bittinen mikrokontrolleri olisi jo enemmän kuin riittävä. Kuitenkin mahdollinen resistiivinen toimintamuoto vaatisi valitulla toteutustavalla mielellään korkeampaa kellotaajuutta, jotta laskennassa syntyvät viiveet eivät kasva liian pitkiksi. Monia edullisia 8-bittisiä mikrokontrollereita löytyy suuremmallakin kellotaajuudella, joten sellaisen valinta ei aiheuta ongelmia. Koska erityistä syytä muuhunkaan ei löytynyt, päätettiin pysytellä tutussa Atmelin AVR-sarjassa. Ohjelmointiin käytettävän työmäärän arvioitiin tällä toimintatavalla pysyvän kohtuullisena. Tarvittavaksi ohjelmamuistin määräksi arvioitiin 4-8kB.

Seuraavaksi käytiin läpi AD- ja DA-muuntimille asetetut vaatimukset. Alustavan määrittelyn kaltaisiin resoluutioihin ja säätöalueisiin pääteltiin pystyttävän jos käytössä olisi 12-bittiset muuntimet, mutta hyväksyttiin vaihtoehtoisesti myös 10-bittisten käyttö. 14-bittisiin ja suurempitarkkuuksiin muuntimiin ei tässä aktiivisen kuorman versiossa nähty tarvetta, sillä lisää resoluutiota ei kannata ottaa käyttöön ennen kuin konseptia on edes alustavasti kokeiltu. Muuntimien nopeuksiakaan ei katsottu kovin kriittisiksi, koska suuri osa halvimmistakin muuntimista kykenee ainakin 1Msps nopeuteen.

Sopivia muuntimia löytyi kyllä runsaasti, eikä olisi ollut ongelma vain ottaa sopivia ja toteuttaa toimintoa niillä. Heräsi kuitenkin ajatus mikrokontrollerista jossa olisi kyseiset muuntimet integroituna. Integroitu toteutus mahdollisesti säästäisi piirilevytilaa, tulisi halvemmaksi ja saattaisi olla jopa nopeampi koska tietoa ei tarvitsisi siirtää kahteen kertaan sarjaväylän ylitse.

Atmelilta löytyikin joukko näitä toiveita vastaavia AVR-sarjaan kuuluvia Xmega-mikrokontrollereita. Vaatimattomampien kontrollerien saatavuus vaikutti huonolta ja hintaero malliston parempiin suhteellisen pieneltä. Lopulta päädyttiin AVR-sarjan mikrokontrolleriin Xmega128A1, joka on ominaisuuksiensa puolesta enemmän kuin riittävä. 128KB ohjelmamuisti, 8kB RAM, 32MHz kellotaajuus, 78 IO-linjaa, kaksi 12-bittistä DA-muunninta, kaksi 12-bittistä AD-muunninta ja paljon kaikkea jota ei tässä työssä tulisi oikeasti edes tarvitsemaan.



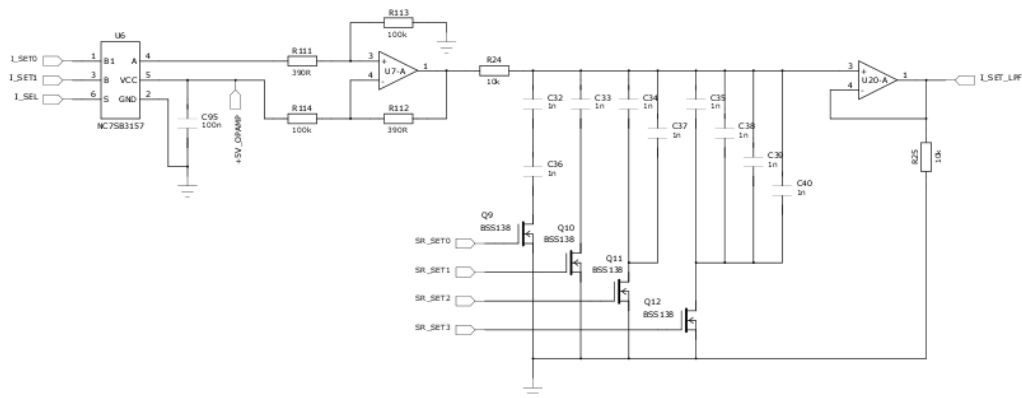
Kuva 36: Mikrokontrolleri

Kuten jo aiemmin mainittiin, kuorman virtaa säättävä kytkentä on laitteessa toteutettu tehlohkossa. Ohjaus ja takaisinkytkentä on analoginen, mittaus- ja ohjauslohko ainoastaan antaa jännitetietona virran asetusarvon. Kuorman säätöön liittyy myös kuorman jännitteen mittaus, joka on toteutettu tässä lohkoissa. Jännite alennetaan vastusjaolla joka edelleen puskuroidaan operaatiovahvistimella ja syötetään AD-muuntimelle. Kytkentä on esitetty kuvassa 37. Joten käytettäessä kuormalla toimintamuotoa joka vaatii tiedon kuorman yli vaikuttavasta jännitteestä, osa takaisinkytkennästä toteutetaan mikrokontrollerin avulla. Resisttiivisessä toimintamuodossa mikrokontrolleri laskee asetetun resistanssin ja kuorman jännitteen perusteella oikean kuormavirran.





Kuvassa 39 on esitetty virran asetusarvoa muokkaavaa kytkentää. Mikrokontrollerin yhden DA-muuntimen molemmat lähdöt tuodaan kuvan vasemmassa laidassa multiplexerille. Piiriä ohjataan mikrokontrollerin laskurilohkon tuottamalla PWM-signaalilla, jolla voidaan nopeasti vaihdella kahden virta-arvon välillä. Operaatiovahvistin U7 toimi alkuperäisessä suunnitelmassa vain puskurina, mutta sen ympärille rakennettiin myöhemmin differentiaalivahvistin poistamaan DA-muuntimen offsettia. Operaatiovahvistinkytkentä vähentää sille tulevasta jännitteestä noin 20mV, koska Xmega muuntimen ulostulo ei yllä maahan saakka. Keskellä kytkentää on joukko kondensaattoreita, joiden toinen puoli voidaan maattaa pienen FETin kautta. Yhdessä vastuksen R24 kanssa ne muodostavat säädettävän alipäästösuotimen. Tätä suodinta käytetään rajoittamaan kuormavirran ohjaussignaalin nousunopeutta. Lopuksi U30 puskuroi suotimen ulostulon ja jakaa signaalin pääteasteille.



Kuva 39: Kuorman ohjaus

Nousunopeuden rajoittamiseen soveltuisi paremman transkonduktanssivahvistin, jolla voisi tehdä yksinkertaisen kytkennän joka todella säätäisi nousu- ja laskunopeutta. Toteutettu kytkentähän on alipäästösuodin, joten se kyllä rajoittaa nousu- ja laskunopeutta, mutta samalla se tarpeettomasti myös pyöristää signaalia. Epäideaalisuudestaan huolimatta se kuitenkin suoriutuu tehtävästään riittävän hyvin. Transkonduktanssivahvistimen käyttöä kyllä tutkittiin yhtenä mahdollisuutena ja se toteutettiin simulaatiossa, mutta se hylättiin kun soveltuvia operaatiovahvistimia ei tuntunut löytyvän. Transkonduktanssioperaatiovahvistimia tuntui olevan markkinoilla kovin vähän, nekin joko hyvin vanhoja tai kalliita erikoiskäyttöön tarkoitettuja.

### 5.4.3 Teholähdelohko

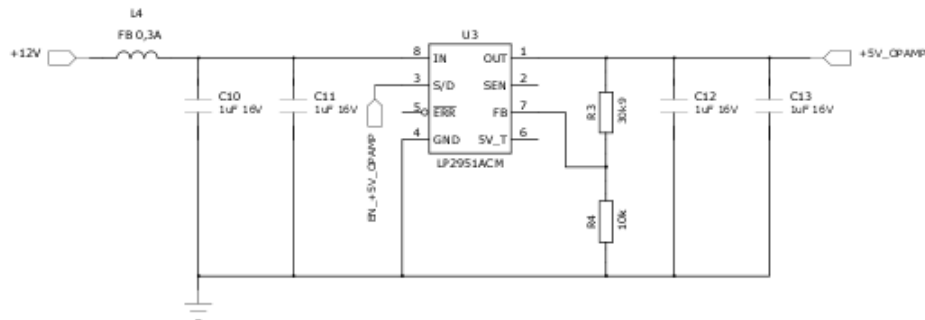
Teholähdelohkon verkko-osuus päätettiin toteuttaa valmiilla teholähteellä, useammastakin syystä. Valmiin teholähteen käyttäminen nopeuttaa laitteen suunnittelua ja toteutusta, jos teholähteelle asetetut vaatimukset ovat järkevissä rajoissa. Tätä valintaa puoltaa myös valmiille teholähteelle jo myönnetty hyväksynnät, jolloin niistä ei tarvitse huolehtia itse. Vaikka asialla ei merkitystä juuri kyseisen laitteen tämän version osalta olekaan, niin kuitenkin tehtiin nytkin. Suurin laitteessa tarvittava jännite on +12V, johon kytkeytyy puhaltimien aiheuttama laitteen sisäinen suurin yksittäinen kuormitus. Kaikkien muiden jännitteiden kohdalla todettiin, että ne voidaan reguloida +12V jännitteestä helposti. Riittäväksi virransyöttökyvyksi arvioitiin 0,5A. Maadoitusratkaisuja mietittäessä todettiin sisäinen teholähde ulkoista paremmaksi, koska silloin verkkojohdolla saisi melko tulevan maadoituksen koteloon.

Sähköisten ominaisuuksiensa puolesta sopivia teholähteitä olisi löytynyt paljon, suurin osa kuitenkin karsiutui fyysisesti liian suurina tai hinnaltaan liian kalliina. Jäljelle jäi hinnaltaan edullinen, mutta kooltaan sopivan pieni V-Infinityn valmistama VGS-25-12. Se on hakkuriteholähde joka toimii 88-264V AC-syötöllä, joten sen käyttö tekee laitteesta käyttökelpoisen myös muualla kuin eurooppalaisessa sähköjärjestelmässä. Ulos teholähde antaa +12V jännitteellä virtaa 0-2,1A. Nopeasti katsoan saattaisi vaikuttaa turhalta ylimitoittamiselta, mutta 70°C lämpötilassa laitteen toiminta-alueen laidalla kuormitus voi olla enää 50% nimellisestä.

Kaikki laitteen sisäiset käyttöjännitteet muodostetaan +12V jännitteestä. Sitä käytetään sellaisenaan laitetta jäähdyttävien puhaltimien tehonsyöttöön, joka on hyvin epäkriittinen ja ennemminkin tuottaa häiriötä kuin häiriintyy mistään. Sisään tulevassa tehonsyöttölinjassa on noin 1000uF edestä kondensaattoreita paikallisena energiavarastona. Käyttöjännite on suojattu 13V ylijännitesuojalla, joka yksisuuntaisena toimii myös suojana väärältä polariteetilta. Sulaketta tässä rakenteessa ei käytetä, vaan luotetaan käytettävän ulkoisen teholähteen suojauksiin vikatilanteessa. Koska ulkoinen teholähde on kiinteästi asennettu aktiivisen kuorman kotelon sisään, sen kytkennät eivät normaalisissa käyttötilanteissa ole alttiita muutoksille.

Laitteen sisällä regulaattoreilla muodostetaan viisi erillistä käyttöjännitettä, jotka kaikki ovat laitteen nollapotentiaaliin nähden positiivisia. Analogisille piireille muodostetaan +5V ja +11V käyttöjännitteet ja lisäksi erillinen +11V jolla syötetään vain tehlohkojen analogiakytkimiä. Analogisille kytkennöille käytettävät käyttöjännitteet saa ohjattua tarpeen mukaan päälle tai pois, paitsi analogiakytkinten syöttöä joka on aina päällä. Näin saadaan käyttöjännitteet ajettua hallitusti ylös tai alas, eikä käynnistys- ja sammutustilanteessa tule virheellistä toimintaa. On mahdollista että virheellistä toimintaa ei tulisi ilman näitä varotoimenpiteitäkään, mutta joitain asioita on hyvä varmistaa useaan kertaan. Lisäksi laitteeseen voidaan myöhemmin lisätä valmiustila, jossa laite voidaan tarpeettomilta osilta sammuttaa.

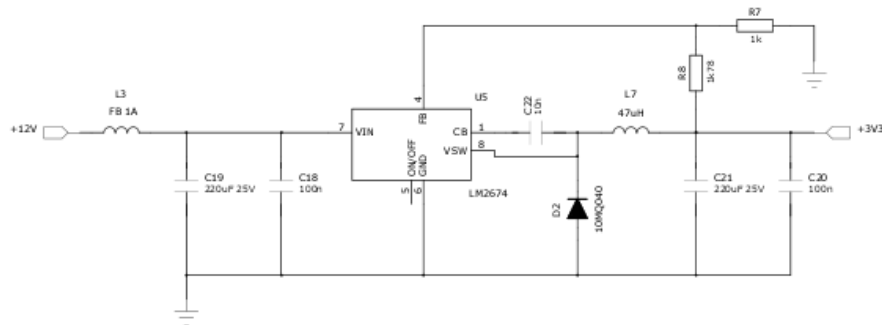
+11V ja +5V käyttöjännitteet muodostetaan lineaariregulaattoreilla, koska tarvittava virta on pieni. Näiden regulaattoreiden osalta nousi esiin kaksi rajoittavaa ominaisuutta, jotka kumpikin sulkivat pois normaalin LM317-yleisregulaattorin käytön. +11V reguloinnissa jännitettä tiputetaan vain yksi voltti, ehkä allekin jos +12V syöttöjännite on alhainen. Kriteeriksi asetettiin että regulaattorin tulisi toimia vielä 11,5V syöttöjännitteellä. Lisäksi regulaattorin tulisi olla ulkoisesti ohjattavissa päälle ja pois. Analogiapiirien virrankulutusta arvioidessa päädyttiin tulokseen, että kaikissa käyttöjännitteissä kevyille regulaattoreille tyypillinen 100mA riittäisi. Samalla varmistui että suurimpaan osaan tapauksista voidaan käyttää samaa regulaattoria, joka tuo osaltaan pienen kustannussäästön. Useista saatavilla olevista vaihtoehtoista päädyttiin laajalti käytettyyn piiriin LP2951. Käytetty kytkentä on esitetty kuvassa 40. Ominaisuuksiltaan LP2951 sopii tähän käyttöön erinomaisesti.



Kuva 40: Lineaariregulaattori

Neljännellä ja viidennellä regulaattorilla tuotetaan +3,3V jännite digitaalipiireille ja mikrokontrollerin analogialohkole. Mikrokontrollerille päätettiin käyttää häiriöiden vähentämiseksi erillistä analogiakäyttöjännitettä, koska AD- ja DA-muuntimien toiminta on sovelluksen kannalta oleellista. Toteutus on sama kuin edellä esitetyissä +11V ja +5V regulaattoreissa. Digitaalipiireille tuotettua +3,3V jännitettä käytetään myös käyttöliittymälohkon näytössä ja näppäimissä. Käyttöjännitteitä mitoittaessa ei ollut vielä täysin selkeää paljonko kuormitusta digitaalipuolen käyttöjännitteelle tulisi, esimerkiksi LCD-näytön taustavalon ja muiden mahdollisten merkkivalojen vuoksi. Koska myös pudotettava jännite on muita käyttöjännitetapauksia suurempi, ei sitä haluttu toteuttaa lineaarisesti. Jännitteen reguloinnissa päädyttiin pieneen hakkuriin jonka 0,5A virranantokyky on hyvin riittävä.

Koska työn pääaiheena ei ollut tehollähteen suunnittelu, päädyttiin tässäkin kohtaa puolivalmiiseen toteutukseen. Hakkuri rakentuu pitkälle integroidun LM2674 ympärille, joka tarvitsee vain oheiskomponentteikseen vain kuristimen, diodin ja kasan kondensaatoreita. 260KHz kytkentätaajuuden ansiosta komponentit jäävät myös fyysisesti pieniksi, joten kokonaisuus ei vie paljoakaan piirilevytilaa. Kytkenä on esitetty kuvassa 41.



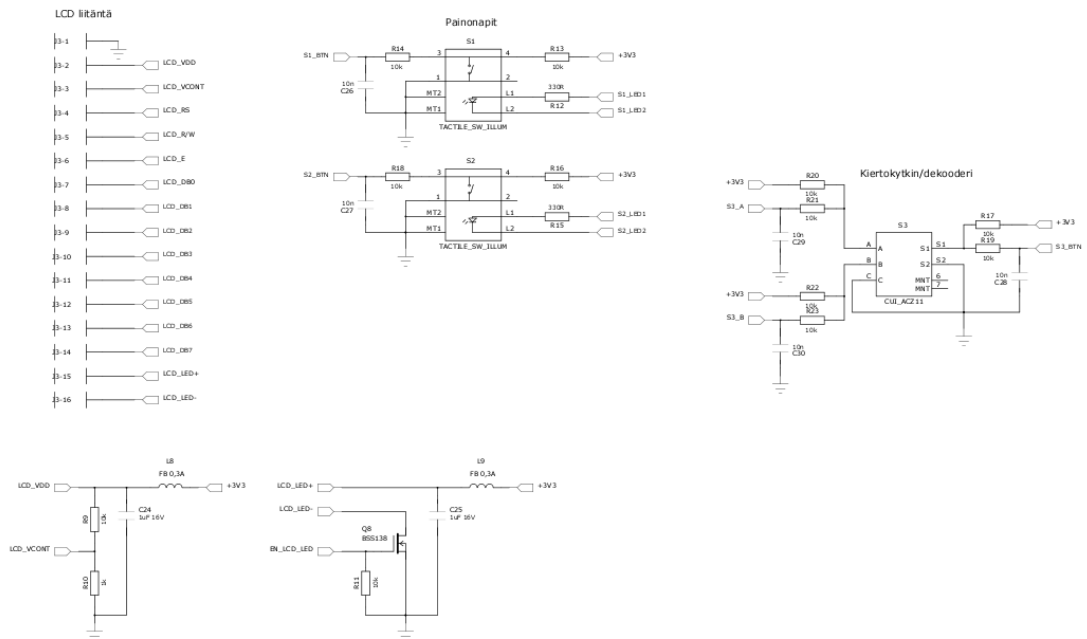
Kuva 41: Hakkuriregulaattori

#### 5.4.4 Käyttöliittymälohko

Käyttöliittymälohkon suunnittelun alkuvaiheessa kaavailtiin, että käyttöliittymän syöteen vastaanottoon riittäisi yksi rulla ja pari nappia. Vastaavasti informaatiota käyttäjän suuntaan siirrettäisiin LCD-näytöllä ja muutamalla merkkivalolla. Yhden napin oli tarkoitus toimia virtakytkimenä, jolla laite saadaan valmiustilaan tai käyttötilaan. Toisen napin oli tarkoitus kytkeä kuormaa päälle ja pois. Napeiksi oli valittu LED-merkkivaloilla varustetut versiot, jolloin niiden tilan näkisi selkeästi ja nopeasti. Kuitenkin laitteen kehityksen aikana huomattiin, että kokonaisuuden hallinta olisi selkeämpää kun se toteutettaisiin minimalistisena. Joten päädyttiin pelkästään painonapilliseen rullaan ja LCD-näyttöön, jolloin käyttöliittymästä tulee houkuttelevan yksinkertainen ja helppokäyttöinen. Lisäksi tarvittava laitteisto pysyy yksinkertaisena. Käyttöliittymälohkon toteutus on esitetty kuvassa 42.

Rullan keskeisenä elementtinä on kvadratuurienkooderi, joka sen akselia pyöritettäessä antaa ulos pulsseja. Kyseiset enkooderit jakautuvat ulostulonsa ominaisuuksien mukaan kahteen ryhmään, absoluuttisiin ja suhteellisiin. Absoluuttisen enkooderin ulostulosta voidaan lukea akselin asento nollakohtaan nähden. Suhteellisesta enkooderista puolestaan ei saada suoraan paikkatietoa, vain tieto paikan muutoksesta. Tässä sovelluksessa sopivampi vaihtoehto on suhteellinen enkooderi, koska käyttöliittymän kannalta on kiinnostavaa ainoastaan se kumpaan suuntaan ja millä nopeudella rullaa pyöritetään.

Tämän tyyppisessä enkooderissa on yleensä kaksi ulostuloa, joiden vaihe-erosta voidaan päätellä pyörimissuunta. Mikrokontrolleria valitessa kävi ilmi että ATXMEga-mikrokontrollereissa on myös sisäinen kvadrantuuridekooderi, joten sen toimintaa päätettiin tarkastella ohjelmointivaiheessa. Myöhemmin kävi kuitenkin ilmi että tutustuminen mikrokontrollerin datalehteen oli ollut puutteellista, dekodeerin käyttö ei ollutkaan mahdollista siinä portissa johon enkooderi oli jo fyysisesti kytketty. Enkooderin käsittely hoidettiin alkuperäisen idean mukaan ohjelmallisesti.



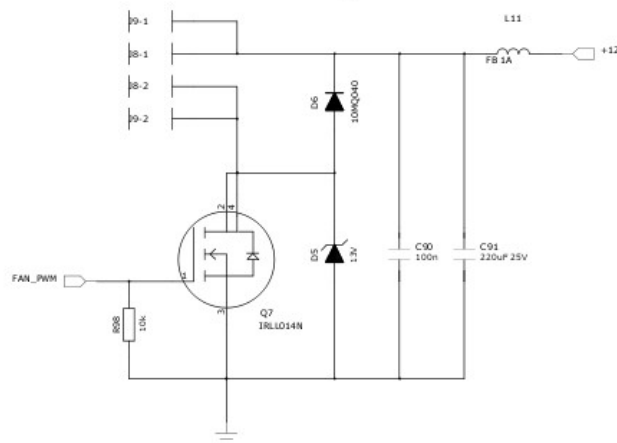
Kuva 42: Käyttöliittymä

Enkooderiksi valittiin CUI:n ACZ11-sarjan mekaaninen malli. Resoluutioksi valittiin 20 pulssia kierrosta kohden, koska se tuntui käytettävyyden kannalta sopivalta. Valitussa mallissa on myös pyöritettäessä toistuva pieni kynnys, joka tekee liikkeestä täsmällisempää ja antaa käyttäjälle hyvän fyysisen palautteen rullan kääntymisestä. Akselin päähän on asennettu halkaisijaltaan noin 30mm oleva matala nuppi, joka viimeistelee käyttötuntuman. Nupin reunat karhennettu, jotta ote on riittävän varma tarkassakin säädössä. Nupin päällä on sormelle sopiva syvennys, jonka avulla voi vaivatta pyörittää nuppia nopeasti useita kierroksia.

Koska kaikki käyttäjälle suunnattava informaatio päätettiin esittää LCD-näytön avulla, valittiin näytöksi alkuperäisen 2x20-kokoisen sijaan 4x20. Graafisia näyttöjä ei tähän versioon oikeastaan edes harkittu, koska tekstipohjaisen näytön käsittely vaatii ohjelmalta hyvin vähän. Näytöksi valikoitui lähinnä hintansa ja taustavalonsa värin vuoksi Newhaven Displayn NHD-sarjan näyttö. Näytössä on neljä riviä, jokaisella rivillä 20 merkkiä. Rakenteeltaan se on transreflektiivinen STN-näyttö, joten se soveltuu erittäin hyvin käytettäväksi vaikeissakin olosuhteissa kuten kirkkaassa auringonpaisteessa. Myös valmistajan antama  $-20^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$  lämpötila-alue on riittävä, pieni pakkasenkaan ei haittaa toimintaa.

### 5.4.5 Jäähdytyslohko

Jäähdytyslohko on pieni ja koostuu ainoastaan puhaltimia PWM:llä ohjaavasta kytkennästä. Mittaus- ja ohjauslohko ohjaa jäähdytyslohkoa keräämässä lämpötilatiedon perusteella. Puhaltimia ohjaava kytkentä on esitetty kuvassa 43. MOSFETilla ohjataan puhaltimien virta täysin päälle tai kokonaan pois, ja puhaltimien nopeus säätyy pulssisuhteen mukaisesti. Puhaltimien rinnalle on kytketty diodi kierrättämään virtaa kun kytkin-komponentti ei johda. Kytkinkomponentin suojana on sen rinnalla on 13V ylijännitesuoja. Syöttävän tehollähteen puolella on LC-suodin, jotta puhaltimien säädön aiheuttama häiriö pysyisi rajatulla alueella. Puhaltimien liittämistä varten levyllä on kaksi liitintä, joihin voi kytkeä enintään 1A kuorman. Laitteeseen asennettujen puhaltimien virrankulutus on yhteensä enintään 300mA, joten ne voidaan tarvittaessa vaihtaa vieläkin tehokkaampiin.



Kuva 43: Puhaltimien ohjaus

## 5.5 Piirilevy

Jo työn alkuvaiheessa päätettiin, että piirilevy valmistettaisiin itse eikä tilattaisi piirilevytehtaasta. Tämä asetti tiettyjä rajoitteita, joiden pohjalta toimintamalleja oli ohjattava oikeaan suuntaan. Piirilevyllä asetettiin rajaksi kaksi kerrosta, joka riittää tämän laajuiselle laitteelle mainiosti. Myös läpivientien määrä yritettiin pitää pienenä, koska käytettävissä olleessa prosessissa läpiviennit on porausta lukuunottamatta tehtävä käsin. Lisäksi läpivientien sijoittelussa olisi huomioitava, ettei niitä voi normaaliin tapaan asettaa esimerkiksi komponentin alle. Myös komponenttien koteloiden alle asetettiin rajoitus, ettei käytettäisi esimerkiksi BGA-tyylisiä komponentteja. BGA-komponentin juottaminen ei pitäisi olla ongelma, mutta sen alle todennäköisesti vaadittavien läpivientien tekeminen olisi ollut työlästä.

Piirilevyn suunnittelussa käytettiin Mentor Graphicsin PADS-ohjelmistoa. Ohjelmistosta käytettiin PADS Logic ja PADS Layout osia, ensimmäistä piirikaavion piirtämiseen ja toista piirilevyn suunnitteluun. Ohjelmistot olivat jo ennalta tuttuja, joten niiden käyttö sujui ongelmitta. Piirilevyn suunnittelu aloitettiin hahmottelemalla lohkojen väliset yhteydet ja niiden sijainti toisiinsa nähden. Samalla tarkasteltiin tuottaako lohko häiriötä, onko se altis häiriintymään tai onko sen sijoittelussa muita vaatimuksia. Lohkojen asettuessa paikalleen niille varatulle piirilevytilalle voitiin tarkastella maadoitusrakenteen toimivuutta ja ohjata paluuvirrat kulkemaan haluttuja reittejä. Kun samalla pystyttiin asettamaan lähekkäin lohkot joiden välillä kulkee paljon signaaleja, saatiin pituudet pysymään kohtuullisen pieninä. Varsinainen piirilevyn suunnittelu on luova prosessi, johon vaikuttavat hyvin paljon suunnittelijan tiedot ja aikaisempi kokemus. Piirilevy ei käytännön tapauksissa koskaan voi olla ideaalinen, vaan se on aina suunnittelijan parhaan näkemyksensä avulla luoma kompromissi asetettujen vaatimusten pohjalta.

Piirilevystä muodostui kuvan 43 mukainen. Kuvassa levy jaettu katkoviivoin lohkojen rajoja seuraten. On huomattava että kyseisessä kuvassa on esitetty molempien puolien komponentit, joten se ei anna tarkkaa kuvaa piirilevystä. Se on kuitenkin riittävä lohkojaon hahmottamiseen. Piirilevyn tiedot löytyvät liitteestä. Ne eivät kuitenkaan ole täysin ajan tasalla, koska kytkentään on myöhemmin tehty joitain muutoksia. Niistä käy kuitenkin ilmi piirilevyn rakenne ja käytetyt maadoitusratkaisut.

Noin puolet levystä on varattu teholohkolle, joka näkyy vasemmassa laidassa. Teholohkon alalaidassa näkyvät liittimet joiden kautta testattava laite liitetään aktiiviseen kuormaan. Kuvasta näkyy myös MOSFETtien sijoittelu samaten vasemmassa laidassa. Kyseisessä kohdassa levyn kummallakin pinnalla on laaja johtava taso joita käytetään suuren kuormavirran reittinä. Näin saadaan minimoitua kuormavirran aiheuttama häiriö, ja toisaalta taataan sille mahdollisimman pieni-impedanssinen väylä levyllä.

Teholähdelohko on oikeassa laidassa, sen yläosassa on ulkoisen teholähteen liitin. Liittimen vieressä ovat suodatus- ja suojauskomponentit, joiden jälkeen +12V syöttö jaetaan kullekin regulaattorikytkennöille suodatuksen läpi. Teholohkon vaatimat käyttöjännitteet muodostetaan lähellä lohkojen rajaa, kolmessa erillisessä regulaattorikytkennässä. Mikrokontrollerin käyttöjännitteestä huolehtiva hakkuriregulaattori on asetettu levyn oikeaan laitaan, lähelle suotokondenssattoreita ja sisääntuloa. Mikrokontrollerin analogiapuolen käyttöjännitteen regulaattorikytkentä on lohkon alalaidassa, lähellä käyttökohdettaan.

Jäähdytyslohko on levyn ylälaidassa, aivan ulkoisen teholähteen liittämän vieressä. Jäähdytyslohko aiheuttaa suurimman virrankulutuksen ja saattaa aiheuttaa häiriöitä, joiden vaikutukset on tällä sijoittelulla pyritty pitämään mahdollisimman vähäisinä. Puhallimet liitetään jäähdytyslohkossa oleviin liittimiin. Piirin muodostama virtasilmukka on pyritty pitämään pienenä, joten sen ei pitäisi juurikaan häiritä muuta laitetta.



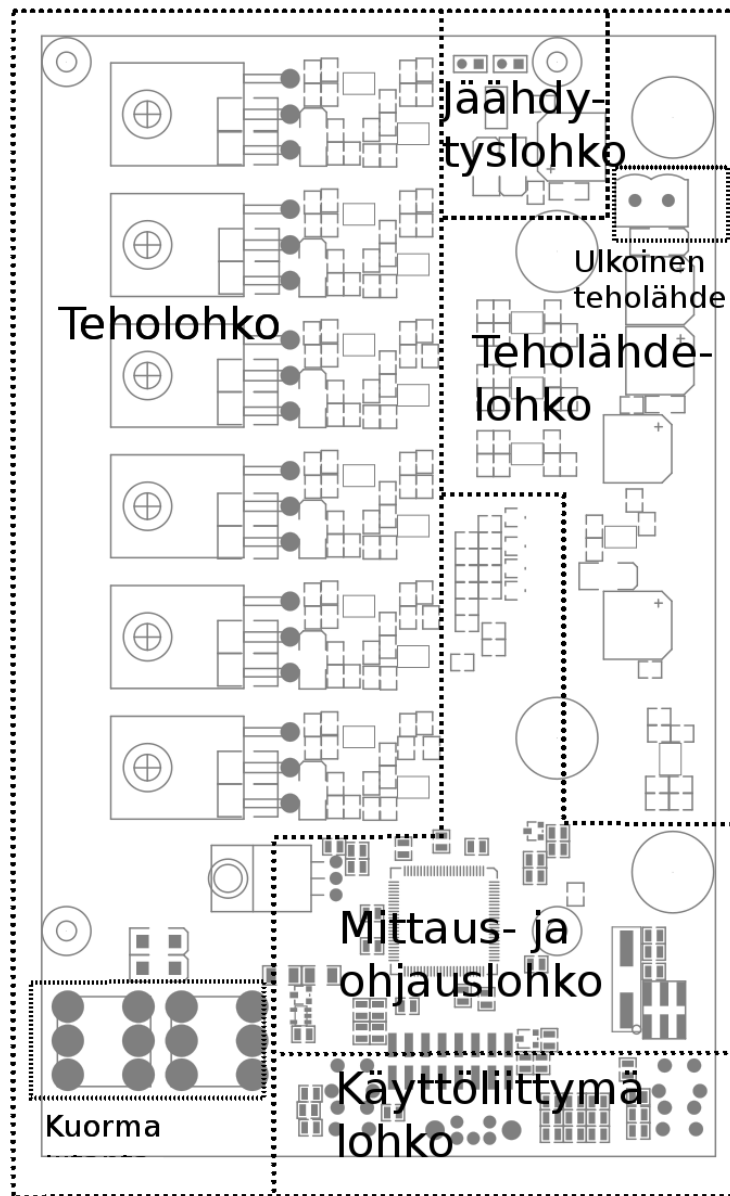
Käyttöliittymälohko on levyn alalaidassa, keskitettynä laitteen etupaneelin tuntuun. Lohkossa on tässä toteutuksessa tarpeettomiakin osia, sillä levyllä on fyysisesti asennettuna myös napit ja merkkivalot joita päätettiin olla käyttämättä. LCD-näyttö asennetaan levyllä olevaan liittimeen lyhyen kaapelin avulla, fyysisesti näyttö kiinnitetään laitteen etupaneeliin.

Mittaus- ja ohjauslohko on levyn keskeisellä paikalla, koska sillä on rajapinta kaikkien muiden lohkojen kanssa. Tällä toteutustavalla eri lohkojen asettuminen levyille on luontevaa ja vetojen pituudet voidaan keskimäärin pitää lyhyinä. Mikrokontrollerin vieressä oleva liitin on ohjelmointiliitin, eikä sitä normaalissa käyttötilanteessa ole yhdistetty minnekään. Teholohkon vastaisella rajalla voidaan nähdä lämpötila-anturi ja kuormajännitteen mittauskytkentä. Keskemmällä levyä on kuorman ohjaukseen liittyviä toimintoja.

Piirilevy on kiinnitetty kuvassa 44 kuvattu yläpuolelta, suurin osa komponenteista on kuitenkin asennettu levyn alapuolelle. Mittaus- ja ohjauslohkon pääosan ja käyttöliittymälohkon muodostama kokonaisuus on asennettu levyn yläpuolelle. Myös tehlohkon MOSFETit ja kuormaliittimet on asennettu ovat levyn yläpuolella. Tähän järjestelyyn on päädytty koska levy on asennettu jäähdytys-elementin alle, näin MOSFETit saadaan kiinnitettyä jäähdytyslevyyn. Tästä rakenteesta kerrotaan tarkemmin laitteen mekaniikkaa käsitellessä.

Piirilevyn valmistamisen osalta oli valittavissa kaksi toisistaan eroavaa prosessia. Ensimmäisessä piirilevy olisi valmistettu valottamalla ja syövyttämällä, jonka jälkeen reiät olisi porattu käsin. Toisena vaihtoehtona piirilevyn valmistus jyrsimellä, jolloin porauskin olisi automaattinen. Vaihtoehtoista päädyttiin jälkimmäiseen, ensimmäinen oli kuitenkin varmistuksena jos toisen kanssa tulisi ongelmia. Piirilevy jyrtsittiin LPKF:n valmistamalla Protomat 95s-II piirilevyjyrsimellä. Materiaalina käytettiin normaalivahvuista, kaksipuoleista 1,6mm FR4-piirilevyä. Työstöprosessin kulkuun, ominaisuuksiin tai vaatimiin esivalmisteluihin ei tässä yhteydessä luoda syvempää katsausta. Työstetty piirilevy puhdistettiin ja suojattiin fluxia sisältävällä pinnoitteella.

Komponentit asennettiin piirilevyyn käsin, koska kyseessä oli yksittäiskappale. Samalla juotettiin jokaiseen läpivientiin pieni pala katkaistua komponentin jalkaa, koska käytetyllä piirilevyprosessilla ei saa aikaan läpikuparoituja levyjä. Pienempien komponenttien juottamiseen käytettiin Kada 852D+ kuumailma- ja juotosasemayhdistelmää. Suuremmat komponentit ja maatasoon tulevat läpiviennit juotettiin suurempitehoisemmalla, robustimmalla juotosasemalla. Kaikki juotokset tehtiin lyijytlisestä prosessia käyttäen. Koska tätä laiteyksilöä ei oltu tarkoitettu myytäväksi, siihen ei tarvinnut soveltaa RoHS-vaatimuksia.



Kuva 44: Toiminnalliset lohkot piirilevyllä

Levyä ei pesty eikä suojattu välittömästi valmistuksen jälkeen, kuten normaalisti tehtäisiin. Toimenpiteet lykättiin suoritettavaksi testauksen jälkeen, jotta mahdollisesti korjausta ja muutoksia vaativat tilanteet voitaisiin hoitaa helpommin. Uutta laitetta kehiteltäessä prototyypeissä, joihin tämäkin laite on luettava, saattaa joskus löytyä vikaa joka johtuu suunnittelijan tekemästä virheestä tai huolimattomuudesta. Toisaalta vika voi johtua myös viallisesta tai väärin asennetusta komponentista, juotoksista, piirilevyprosessin virheistä tai mistä tahansa muusta asiasta koskettavasta seikasta. Alustavan testauksen ja muutoksien jälkeen levy pestiin, puhdistettiin ja kuivattiin. Kuiva levy päällystettiin suojalakalla.

## 5.6 Mekaaninen rakenne

Toteutettu aktiivinen kuorma vaati ympärilleen huomattavan määrän mekaniikkaa, joten mekaniikan suunnittelu ja toteutus veivät merkittävästi aikaa ja resursseja tässä työssä. Valittu toteutus tullaan kuvailemaan pääpiirteittäin, liitteistä löytyvät valokuvat kertovat enemmän. Varsinaisia mitoituskuvia ei tämän työn yhteydessä julkaista. Osasta kappaleita on piirretty kuvat, mutta ne eivät laadultaan vastaa mekaniikkakuville asetettuja vaatimuksia. Lisäksi kappaleisiin on saatettu tehdä kuvista poikkeavia muutoksia tai lisäyksiä, joten ne eivät vastaa toisiaan. Osasta mekaanisia kappaleita kuvia ei ole, koska ne on työstetty käsin karkeiden hahmotelmien perusteella. Kuvien saattaminen julkaistavaan kuntoon olisi työn loppuvaiheessa vienyt liikaa resursseja, joita ei etenkään ajan puolesta enää ollut.

Laite on koottu muoviseen instrumenttikoteloon, jonka leveys on 22cm, korkeus 12cm ja syvyys 23cm. Kotelossa on instrumenttikotelolle tyypillinen kääntyvä kahva, joka soveltuu laitteen kantamiseen ja kallistamiseen. Muovinen, pienehkö kotelo valittiin etupäässä siksi, että se tarjosi hyvät ominaisuudet sopivalla hinnalla. Järeämpi metallinen kotelo olisi ollut monelta kannalta parempi, mutta hinta painoi valinnassa enemmän. Ja kuten jatkosta voidaan huomata, myös edullinen muovikotelo on käyttökelpoinen kun laite rakennetaan sen mukaan.

Kotelon pohjalle suunniteltiin pohjalevy, jonka tehtävä yhdessä jäähdytyslementin kanssa on toimia koko laitteen kantavana runkona. Näin muoviseen koteloon ei kohdistu turhia rasituksia ja samalla laitteen sisäinen rakenne on fyysisesti tukeva. Koko laite voidaan tarvittaessa poistaa kotelosta toimivana kokonaisuutena. Pohjalevy on valmistettu 6mm paksuisesta alumiinilevystä, jonka mitat ovat noin 20x20cm. Levy on riittävän tukeva pitääkseen muotonsa, ja jotta siihen saadaan tehtyä kestäviä kierteitä. Pohjalevy ja kotelo suunniteltiin liitettäväksi toisiinsa 16 ruuvien avulla, jolloin yksittäisen ruuvien ei tarvitsisi kestää kovin suurta rasitusta. Yhteensä pohjalevyssä on noin 30 erikokoista kierteellistä tai kierteetöntä reikää ja aukkoa, joiden kaikkien on oltava kohdallaan.

Pohjalevyn päälle kiinnittyy jäähdytyslementti kuudella 50mm pituisella M4-korotustapilla. Rakenteen tukevuutta lisää jäähdytyslementin alempi puolikas, joka tässä kiinnitystavassa painautuu kiinni pohjalevyyn. Koska jäähdytyslementin puolikkaan korkeus on sama kuin käytetyn korotustapin pituus, on sovitusta tiukka ja pitävä. Jäähdytyslementin puolikkaat on yhdistetty toisiinsa tiukasti neljällä M4-ruuvilla, tämän lisäksi ne painautuvat edelleen tiukemmin yhteen kun jäähdytyslementti kiinnitetään pohjalevyyn. Jäähdytyslementtien kulmista oli poistettava pienet palat, jotta kotelon puolikkaita yhdessä pitävälle rakenteelle jäi tilaa.

Pohjalevyyn on lisäksi kiinnitetty ulkoinen teholähde ja suojauspiirin sulakkeenpidin. Teholähde on metallikotelostaan ruuvattu kiinni pohjalevyyn. Koska teholähteen metallikotelo on samalla sen jäähdytyslementti, muodostuu pohjalevystä sille jäähdytyslementin jatke. Varsinaisesti tälle ei olisi tarvetta, koska teholähdettä käytetään hyvin kevyellä kuormituksella sen ominaisuuksiin nähden. Pohjalevyssä on myös laitteen maadoituspiste, joka koostuu yhdestä M5-ruuvista johon kaikki maadoitusjohtimet yhdistetään. Laitteen sisäinen metallirunko on siis maadoitettu.

Piirilevy on kiinnitetty jäähdytyslementin ylemmän puolikkaan alapintaan 8mm M3-korotustapeilla ja ruuveilla. Lämpöä tuottavat MOSFETit saadaan kiinnitettyä jäähdytyslementissä oleviin M3-kierteisiin piirilevyssä olevien reikien lävitse. Koska jäähdytyslementti on maadoitettu ja käytettyjen MOSFETtien taustalla on nieluun yhdistetty metallialue, on ne eristettävä toisistaan.

Eristemateriaalin on tässä sovelluksessa ensisijaisesti johdettava lämpöä mahdollisimman hyvin, jännitekestoisuutta ei tarvita kuin korkeintaan 200V. Lämpöä johtava eristematto vaikutti ominaisuuksiensa puolesta siedettävältä ja tuotannollisesti helpolta ratkaisulta. Tässä päädyttiin käyttämään Bergin valmistamaa, Sil-Pad tuotenimellä myytävää materiaalia. Tuoteperheestä valittiin halvimista vaihtoehtoista lämmönjohtavuudeltaan paras, jota sai valmiiksi muotoiltuna TO-247 kotelolle sopivina paloina. Valinta oli SP900S, jonka lämmönjohtavuus on  $1,6\text{W/mK}^{-1}$ . Myös sen yli 5kV läpilyöntikestävyys ja  $-76 - +356^{\circ}\text{C}$  lämpötila-alue riittävät hyvin.

Piirilevyssä olevan kvadrantuurienkooderin akseli tulee läpi etupaneelistä, jossa enkooderin runko on kiinnitetty ruuvilla paneeliin. Näin rullan pyöryksestä aiheutuva rasitus saadaan pääosin suunnattua etupaneeliin ja sitä myöden laitteen runkoon. Enkooderin runkoon, juotokseen ja piirilevyyn ei näin ollen kohdistu juurikaan rasitusta. Näyttö on asennettu sille tehdyn aukon taakse, aukko on peitetty kehystetyllä ja läpinäkyvällä suojalevyllä. Näyttö on siis hyvin suojattu, lisäksi sen rakenne saadaan sähköisesti pidettyä erossa etulevystä. Myös enkooderin metallinen runko joka koskettaa etulevyä, on piirilevyllä erotettu sopivalla suojaetäisyydellä. Enkooderin sisällä toiminnalliset ovat on valmistajan mukaan erotettu rungosta. Näitä toimenpiteitä tarvitaan koska kuorma voi kelluessaan olla eri potentiaalissa kuin laitteen runko ja metalliosat.

Etulevyssä on lisäksi aukko sulakkeelle, joka on osa suojapiiriä. Sulakkeen pää on näkyvissä etupaneelissa, jossa se on käyttäjän vaihdettavissa. Sulakkeen vieressä on kolmen naparuuvien muodostama liitäntäpiste, johon testattava laite voidaan kytkeä. Piirilevy, liittimet ja sulakepidin on yhdistetty toisiinsa lyhyillä ja paksuilla johtimilla. Piirilevyssä on liittimet, joihin voidaan liittää M5-ruuvien alle helposti ja tukevasti rengasmainen liitin. Etupaneelin naparuuveista maadoitus on keskellä, joten se voidaan sopivalla välikappaleella sillata yhteen kumman tahansa kuormaterminaalin kanssa.

Etupaneeliin on jätetty suojattu aukko imuilmalle, jota puhaltaa ulos kaksi takapaneeliin asennettua 80mm puhallinta. Käytetyt Sunonin puhaltimet pohjautuvat MagLev-tekniikkaan, jossa perinteinen laakerointi on osittain korvattu magneeteilla. Tämän pitäisi mahdollistaa paitsi liuku- ja kuulalaakereita parempi suorituskyky, myös äänettömämpi toiminta. 1,6W tehoiset puhaltimet pyörivät täydellä teholla 3200 kierrosta minuutissa, optimitilanteessa ne saattaisivat yhdessä siirtää ilmaa yli 120 kuutiota tunnissa. Koska puhaltimen kummatkin puolet ovat samassa paineessa, ei puhaltimen paineominaisuuksista tarvitse juurikaan välittää. Melutasoksi yhdelle puhaltimelle valmistaja ilmoittaa 38dBA, mikä on ilmamäärään ja kokoon verrattuna riittävän pieni.

Takapaneelissa on puhaltimien lisäksi sähköverkkoliitäntä. Se koostuu yhdestä integroidusta paneeliasennettavasta kappaleesta, jossa on IEC C14-liittin, yksinapainen verkkovirtakytkin ja sulakekotelo 5x20mm lasiputkisulakkeelle. Kummankin päädyn paneelit on valmistettu 3mm alumiinilevystä, jotta ne olisivat tarpeeksi tukevia. Koska levy on paksumpaa kuin kotelon valmistaja on suunnitellut käytettäväksi, on sen reunoihin jyrskyttävä kavennus jotta se uppoaa kotelon kiinnitysuriin.

Kotelossa oli hinnastaan huolimatta erikoisominaisuutena säädettävä korkeus. Pohja ja kansi uppoavat jonkin verran irtonaisiin kylkiin. Korkeuden säätöä varten kotelon mukana tuli eri korkuisia holkkeja jotka asetetaan kylkiosan kiinnikkeeseen. Sen pituutta säätämällä voidaan säätää kotelon korkeutta. Kotelon puolikkaat kiinnitetään toisiinsa pitkällä pohjan läpi ja kyljen kiinnikkeen kautta kulkevalla ruuvilla. Vastakierteet ruuville löytyvät kotelon ylemmästä puolikkaasta. Tätä laitetta varten koteloa piti kuitenkin venyttää hieman valmistajan ilmoittamaa maksimikorkeutta suuremmaksi, joten ylemmän puolikkaaseen asennettiin 18mm M4-korotustapit ja kylkiosiin liimattiin 20mm pituiset holkit. Kotelon korkeus saatiin halutuksi, ja koteloa aukaistessa kaikki lisätyt osat jäävät kuitenkin paikalleen eivätkä tipu pois.

## 5.7 Ohjelma

Laitteen ohjelma tuotettiin Atmelin ilmaisella AVR Studiolla ja se on kokonaisuudessaan kirjoitettu symbolisella konekielellä. Ohjelmaan nykyiseen versioon ei aikataulun vuoksi toteutettu kuin perustoiminnallisuus. Nykyinen ohjelmaversio on suunnattu enemmän tuotekehitystä tukevaksi. Laite kuitenkin jo tämän ohjelman kanssa toteuttaa ne toiminnot joita sille oli haluttu, se toimii virtakuormana tai säädettävänä resistanssina. Konekielelle käännettynä nykyinen versio on noin 5kB kokoinen, lähdekoodi vie tilaa 80kB verran. Ohjelma ei vielä tällaisenaan käytä kaikki laitteiston tarjoamia mahdollisuuksia, eikä ole optimoitu.

Mikrokontrollerin käynnistyttyä suoritetaan alustus, jossa kaikki tarvittavien lohkojen ominaisuudet ja asetukset muokataan sopiviksi. Ulkoisten porttien tilat asetetaan kytkentää vastaavaksi ja ajastimet käynnistetään halutuilla arvoilla. Samalla kirjoitetaan AD- ja DA-muuntimille oikeat kalibrointitiedot, jonka jälkeen ne asetetaan muunnostilaan. Puhaltimien ohjaus ajetaan hetkeksi täysille, annetaan sitten mukautua vallitsevaan lämpötilaan. Myös LCD-näyttö herätetään ja alustetaan näytönpäivitysrutiinit.

Alustuksen jälkeen käynnistetään ohjelman pääosuus, jonka toiminta perustuu keskeytyksillä luotuihin ajoituksiin. AD-muunnosten valmistuminen, rullan pyörittäminen ja ajastimet tuottavat keskeytyksiä. Suurimmassa osassa keskeytysrutiineja nostetaan pelkästään lippu pystyyn merkiksi esimerkiksi ajastuksen toiminnasta, ja jätetään sen toteutus pääohjelmalle. Osassa keskeytysrutiineja käsitellään hieman saatujen AD-muunnosten tuloksia, esimerkiksi tallennetaan tuloksia muistiin ja lopulta lasketaan keskiarvo. Kun laitetta käytetään virtakuormana, takaisinkytkentä ei kulje mikrokontrollerin lävitse eikä toiminta ole niin kriittistä. Kun laitetta käytetään säädettävänä resistanssina, joudutaan ajamaan yhtä raskaampaa keskeytystä joka laskee virran arvon asetusta resistanssista ja mitatusta jännitteestä.

Ohjelman pääosuus tarkastelee lippujen tilaa, ja kutsuu aliohjelmaa niiden mukaan. Jos esimerkiksi rullan liikettä ilmaiseva lippu on pystyssä, pääohjelma kutsuu aliohjelmaa joka tulkitsee rullan liikettä tai napin painallusta. Kytkinvärähtelyn aiheuttama häiriö suodatetaan ohjelmallisesti ja tarkastellaan kumpaan suuntaan sekä millä nopeudella rullaa liikutetaan. Tämä aliohjelma kuittaa lipun, ja asettaa puolestaan käyttöliittymää kutsuvan lipun ylös. Tämän jälkeen pääohjelma kutsuu käyttöliittymää käsittelevää aliohjelmaa, joka antaa vasteen rullan liikkeelle.

Aina AD-muunnoksen tuloksen valmistuessa se tallennetaan muistiin. Kun tuloksia on kerätty 16 kappaletta, lasketaan niiden keskiarvo ja käytetään sitä edelleen tuloksena muille ohjelman osille. Aina kun uusi laskettu keskiarvo on valmis, pääohjelma kutsuu aliohjelmaa joka skaalaa arvon, muuntaa se ASCII-merkkijonoksi ja kirjoittaa näyttömuistiin. Jos toimitaan resistanssina, arvoa käytetään myös virran arvon laskentaan. AD-muuntimella mitattua lämpötilaa käytetään myös puhaltimien ohjaukseen, lisäksi sekin ilmoitetaan käyttäjälle näytöllä.

Näytön päivitys hoidetaan siirtämällä jatkuvasti tietoa mikrokontrollerin sisäisestä muistialueesta varatusta näyttömuistista LCD-näytön muistiin. Tämänkin ajoitus hoidetaan laskurilla, keskeytysrutiinilla ja lipulla. Näin tehtynä yksittäisen ohjelman osan ei tarvitse tietää LCD-näytöstä mitään eikä odotella sen hitauden vuoksi, vaan kirjoituksen voi suorittaa nopeasti ja helposti näyttömuistiin.

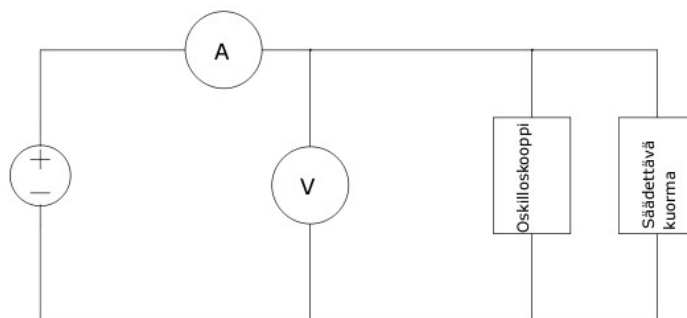
Vaikka ohjelma on pääosin itse tuotettu, joissain kohdin on turvauduttu Atmelin julkaisemiin esimerkkiohjelmiin. Kerto- ja jakolaskurutiinit on lähes suoraan kopioitu Atmelin AVR200-esimerkistä, koska niiden itse tekemisellä ei tällä kertaa olisi saavutettu mitään lisäarvoa. Vaikka käytetyn mikrokontrollerin käskykannassa on 8-bittisten lukujen kertolasku, se ei tässä sovelluksessa riittänyt. AVR200 tarjosi kerto- ja jakolaskurutiinit 8- ja 16-bittisille luvuille. XMegaa koskevat dokumentaatiot eivät osoittautuneet ohjelmoinnin kannalta kovin hyödyllisiksi, sillä ne on tehty C-kieltä ajatellen.

## 6. Säädettävän kuorman arviointi

Työn viimeisessä käydään läpi toteutetun aktiivisen kuorman mittaukset ja verrataan niitä alustavassa määrittelyssä asetettuihin arvoihin. Samalla myös arvioidaan muutoin laitteen onnistuneisuutta. Tarkkaa analyysia laitteen suorituskyvystä ei tehty, jotta työ ei paisunut tarkoitukseensa nähden liian suureksi.

### 6.1 Mittaukset

Laitteen testaus aloitettiin toteutetun aktiivisen kuorman suurimmasta jännitteestä ja virrasta, tarkoituksena todentaa suunnittelussa määriteltujen arvojen toteutuminen. Mittauksissa käytettiin kuvan 45 mukaista testausjärjestelyä. Jännite- ja virtamittaukset tehtiin ulkoisilla mittareilla, kuormajännitteen aaltomuotoa tarkkailtiin oskilloskoopilla. Teholähteenä käytettiin useita erilaisia, tilanteen mukaan sopivaksi katsottuja malleja. Mittauksessa käytettiin virran mittaukseen ensimmäisissä testeissä Mastech MY64 ja jännitteen mittaukseen Fluke 87 V yleismittareita. Ensimmäisessä testissä ei kuvasta poiketen käytetty oskilloskooppia.



Kuva 45: Testausjärjestely

Aluksi todennettiin laitteelle suunnitellun suurimman sallitun jännitteen toteutuminen. Mittauksessa käytettiin Lodestar 8103 teholähdettä, josta saadaan säädettävä 0-60V jännite 0-5A virralla. Kuormavirraksi säädettiin aktiivisesta kuormasta 5A, ja teholähteen jännite asetettiin noin yhteen volttiin. Jännitettä kasvatettiin kunnes saavutettiin haluttu 60V kuormajännite. Jännitealueen testauksena aikana toteutunut suurin hetkellinen tehohäviö oli 300W. Testissä ei havaittu poikkeamia, laite toimi suunnitellulla tavalla.

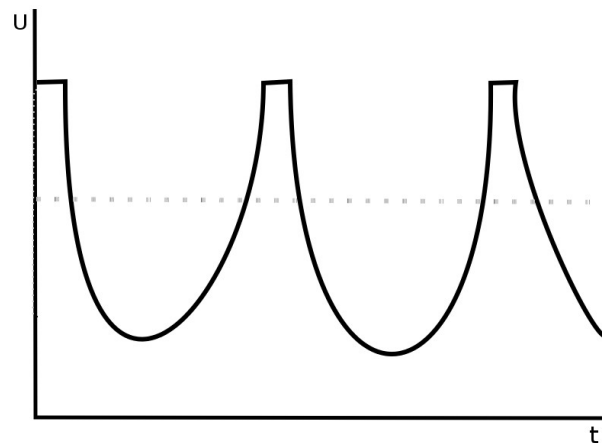


Seuraavaksi oli tarkoitus todentaa virranohjauskyky 60A asti. Tätä ei kuitenkaan voitu tehdä, koska käytetyn Manson SPS9602 teholähteen virranantokyky ei ollut kuin 30A. Testi päätettiin kuitenkin suoritettiin osittaisena 30A asti. Pienemmillä virran arvoilla testattu laite toimi hyvin, mutta noin 15A kohdalla ilmeni ongelmia. Virta- ja jännitemittarit alkoivat näyttää epästabiileja lukemia ja teholähde alkoi päästää korkeataajuista valittavaa ääntä. Koska ensimmäiseen testausjärjestelyyn ei vielä oltu kytketty oskilloskooppia, jännitteen aaltomuotoa ei nähty. Ilmiötä ei ehditty tutkia kovin tarkasti, ennen kuin aktiivinen kuorma vikaantui. Aktiivisen kuorman kuormaterminaalien välillä oli mitattavissa pieni-impedanssinen oikosulku, joka viittasi yhden tai useamman pääteasteen FETin tuhoutumiseen. Testaus keskeytettiin.

Laite avattiin vianetsintää ja huoltoa varten. Vianetsinnän tuloksena huomattiin että yksi kuudesta virtaa ohjaavista FETistä oli vikaantunut. Komponentti korvattiin uudella ja laitteen toiminta todennettiin nopealla testillä pienellä jännitteellä ja virralla. Laite jätettiin odottamaan toista mittauskertaa, jolloin kesken jääneet mittaukset saatettaisiin loppuun. Toinen mittauskerta suoritettiin muuttuneen mittauspaikan vuoksi hieman eri laitteistolla kuin ensimmäinen.

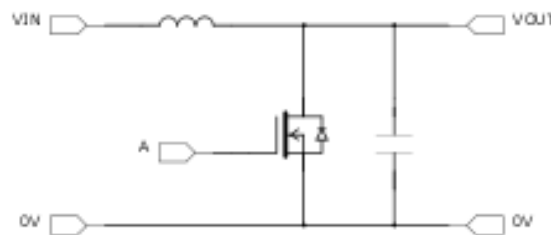
Ennen mittauksen jatkamista päätettiin kuitenkin selvittää laitteen oudon toiminnan ja vikaantumisen syy, sekä mahdollisuuksien mukaan estää vastaavan tapahtuminen jatkossa. Laite kytkettiin kuvan 44 mukaiseen mittausjärjestelyyn. Tällä kertaa oli myös oskilloskooppi, Goldstar OS-7040 (40MHz). Teholähteinä käytettiin enimmäkseen kahden PS3005-teholähdettä, joista saadaan yhdistettynä 60V 5A tai 30V 10A. Virran mittaukseen käytettiin BK Precision 2820 ja jännitteen mittaukseen Mastech MAS830L yleismittareita. Kuorma kytkettiin noin 10V jännitteeseen ja virtaa kasvatettiin 10A asti. Toiminnassa ei havaittu mitään poikkeavaa, kuormajännitteen aaltomuoto oli tasainen ja vakaa DC-jännite.

Päätettiin siirtyä teholahteeseen jonka virranantokyky olisi riittävä, koska epästabiilin käytöksen arveltiin tulevan ilmi vasta suuremmalla kuin 10A virralla. Edellisenä testauskertana käytetty Manson ei tällä kertaa ollut käytettävissä, joten esiin kaivettiin jo iäkkäämpi Farnellin valmistama rakkimallinen modulaarinen teholähde. Teholähteen moduuleista erästä saadaan 5V jännitteellä otettua 70A virtaa, joka soveltuu tarkoitukseen hyvin. Teholähteestä ei ole saatavissa tarkempaa mallia, eikä se ole oleellistakaan. Virtaa mittaava yleismittari ohitettiin testausjärjestelyssä, koska sillä ei voi jatkuvasti mitata 10A suurempaa virtaa. Virranmittaus tehtiin aktiivisen kuorman sisäisellä mittauksella. Kun virta oli noin 13A, alkoi kuormajännitteessä näkyä pientä sinimuotoista värähtelyä. Kun virtaa nostettiin, värähtely lisääntyi ja muuttui aaltomuodoltaan kuvaa 46 vastaavaksi. Keskellä oleva katkoviiva esittää DC-tasoa. Piikkien huiput olivat useita voltteja DC-tason yläpuolella.



Kuva 46: Värähtelyn aaltomuoto

Sama ilmiö pystyttiin toistamaan, vaikka teholähteen tilalle vaihdettiin useampi eri ATX-teholähde. Kaikissa tapauksissa teholähteet saatiin sammuttamaan itsensä kun virta nostettiin noin 20A tasolle. Koska voitiin todeta ettei vika johtunut teholähteestä, alettiin tutkia tarkemmin aktiivisen kuorman ja testausjärjestelyn ominaisuuksia. Teholähteen ja aktiivisen kuorman välisissä johdoissa on tietenkin induktanssia. Aktiivisen kuorman kuormaterminaalien välillä on luonnostaan jonkin verran hajakapasitanssia piirilevyllä ja komponenteissa. Kokonaisuutena tästä muodostuu karkeasti yksinkertaistettuna kuvan 47 mukainen kytkentä.

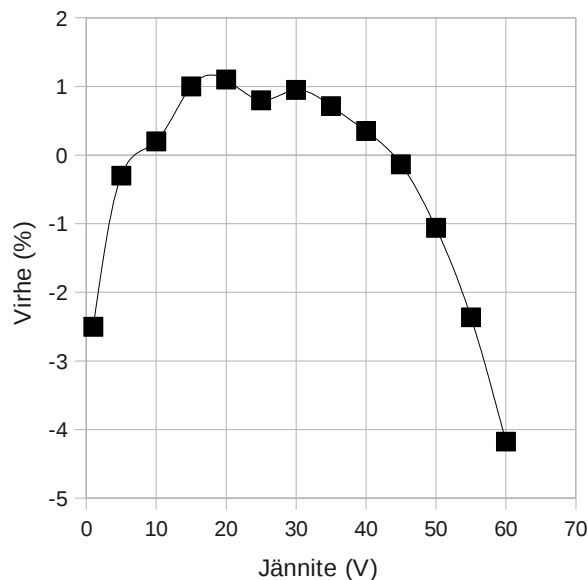


Kuva 47: Värähtelypiirin kytkentä

KytKentä on miltei boost-hakkuria vastaava, ainoastaan kytkinelementin ja kondensaattorin väliltä puuttuu myötäsuuntainen diodi. Tämä sopii yhteen kuvassa 46 esitetyn aaltomuodon kanssa. KytKentä värähtelee ja kykenee nostamaan ulostulonjännitteen syöttöjännitettä suuremmaksi. Koska boost-kytkennälle tyypillistä diodia ei ole, kondensaattori purkautuu syöttävän teholähteen suuntaan aiheuttaen sen ylijännitesuojan aktivoitumisen. Jo kytKentää suunniteltaessa oli mietitty, pitäisikö kuorman rinnalle asettaa hieman kapasitanssia stabiloimaan kytKentää. Koska alustavissa testeillä alle 10A virralla mitään tarvetta toimenpiteeseen ei ilmennyt, se oli jätetty toteuttamatta.

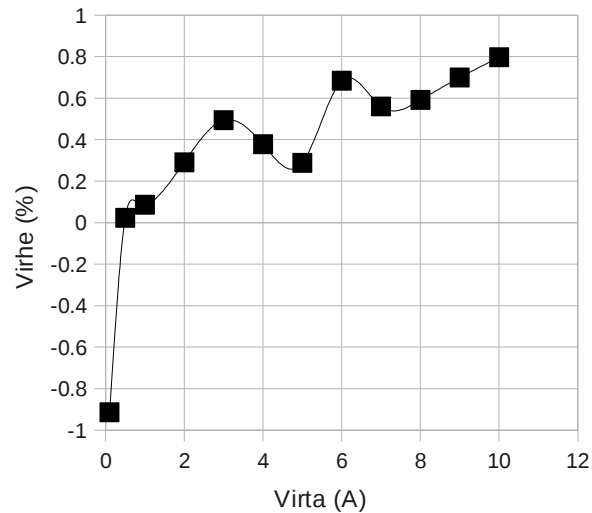
Kuorman terminaalien väliin kytkettiin väliaikaisesti  $10\mu\text{F}$  elektrolyyttikondensaattori. Jälleen virtaa nostettaessa sama ilmiö tuli esiin, mutta edellistä tapausta suuremmalla virralla. Elektrolyyttikondensaattoriksi vaihdettiin kapasitanssiltaan suurempaan, seuraava jännittekestoltaan sopiva oli  $220\mu\text{F}$ . Virta-alueen todentaminen aloitettiin jälleen, tällä kertaa värähtelyä ei enää esiintynyt. Teholähteen ja kuorman väliset  $1,5\text{m}$  pituiset johdot oli muodostettu kytkemällä rinnan neljä  $1,5\text{mm}^2$  johdinta, jotka näin muodostivat  $6,0\text{mm}^2$  johtimen. Käytetyt johtimet oleellisesti vaikuttivat muodostuneeseen värähtelyyn, paksummilla ja lyhyemmilla johtimilla ilmiö olisi ollut vähäisempi.

Testausta jatkettiin mittaamalla sisäisen jännitemittauksen virhe ulkoiseen nähden. Tulokset on esitetty kuvassa 48, jossa virhe ilmoitetaan prosentteina eri kuormajännitteillä. Pienimmällä käytetyllä  $1\text{V}$  kuormajännitteellä havaittiin hieman eroa jännitemittarien lukemissa. Alle  $1\text{V}$  jännitteellä sisäisen mittauksen tarkkuuteen alkoi jo vaikuttaa mahdollisesti epätarkasti määritetty AD-muuntimen offset-arvo. Myös kuormajännitteen ollessa yli  $50\text{V}$ , alkoi virhettä esiintyä enemmän. Voidaan kuitenkin huomata, että jännitemittauksen virhe on noin  $\pm 1\%$  suurimmassa osassa toiminta-aluetta. Tietenkin virhe on tässä tapauksessa vain toiseen mittariin nähden, ei absoluuttinen. Se kuitenkin riittää tämän testin puitteissa, tiedetään että mitattu jännite on edes suunnilleen oikeaa luokkaa.



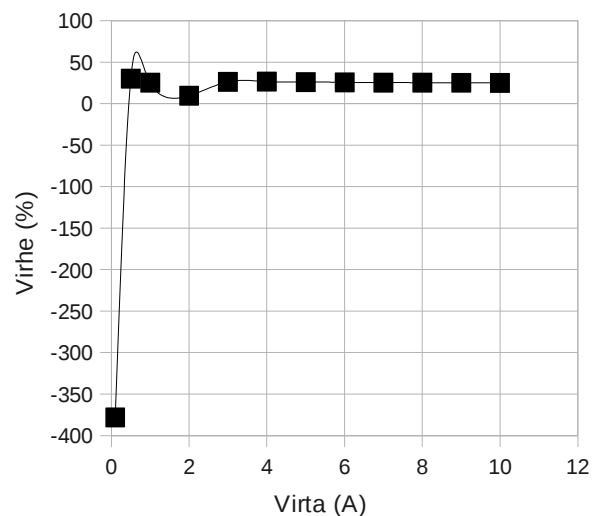
Kuva 48: Jännitemittauksen virhe

Tämän jälkeen jatkettiin johdonmukaisesti ulkoisen ja sisäisen virranmittauksen välisellä virheellä, sekä aktiivisen kuorman virran asetusarvon virheellä. Mittauksessa teholähteen jännitteeksi asetettiin 10V ja aktiivisella kuormalla muutettiin virtaa 0,1A ja 10A välillä. Sisäisen virtamittauksen virhe ulkoiseen nähden on esitetty kuvassa 49.



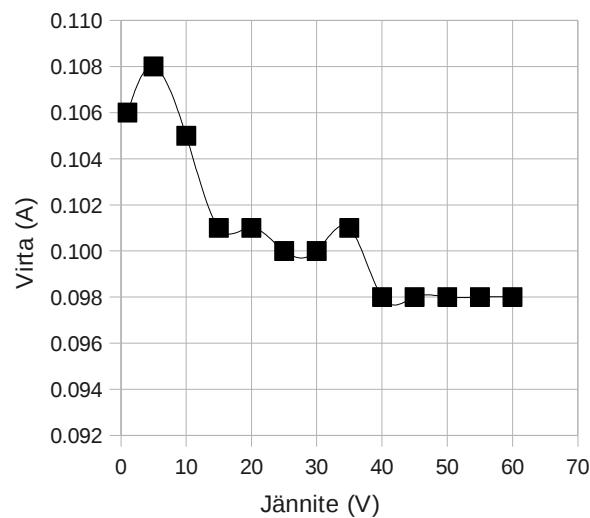
Kuva 49: Virtamittauksen virhe

Kuten jännitemittauksen tapauksessa todettiin, ei tämäkään virhe ole absoluuttinen vaan verrannollinen käytettiin mittariin. Virranmittauksen voidaan todeta toimivan mitatulla alueella hyvin. Virhe on alle  $\pm 1\%$ , vaikka se hyvin pienillä virran arvoilla kasvaaakin. Lisäksi suuremmilla virran arvoilla se kasvaa melko lineaarisesti, joka johtuu ohjelmaan valitusta hieman epätarkasta skaalauskerroimesta. Samassa mittauksessa otettiin talteen myös aktiivisen kuorman virran asetusarvot, joiden virhe ulkoiseen mittariin nähden on esitetty kuvassa 50.

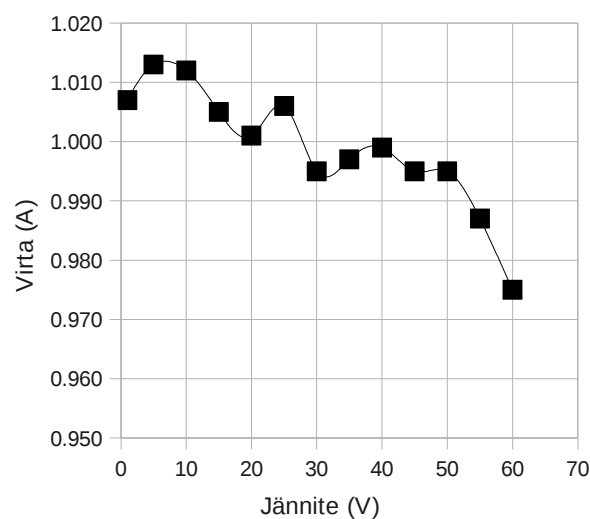


Kuva 50: Virran asetusarvon virhe

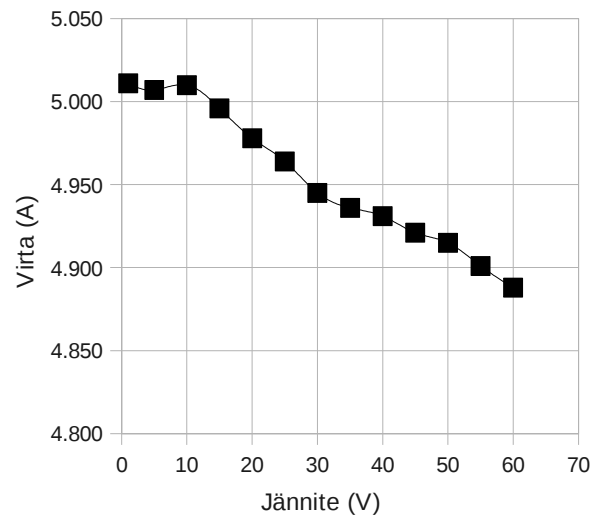
Kuvasta voidaan huomata että hyvin pienillä virran arvoilla asetusarvo ja todellinen alkavat erota merkittävästi. Tämä johtuu siitä ettei tässä toteutuksessa ehditty vielä säätää DA-muuntimen toimivuutta täysin kohdalleen. Kaikilla muilla mitatuilla virran arvoilla on nähtävissä, että virran asetusarvo on noin 25% toteutuvaa arvoa suurempi. Tämä voi tietysti johtua väärin valitusta ohjelman skaalauskerroimesta tai muusta virheestä ohjelmassa. Toisaalta yhden pääteasteen toimimattomuus aiheuttaisi noin 17% virheen, joten ei voitu sulkea pois laitteistotason vikaakaan. Alustavissa testeissä kaikki pääteasteen oli testattu toimiviksi, mutta ei viimeisimmän korjauksen jälkeen.



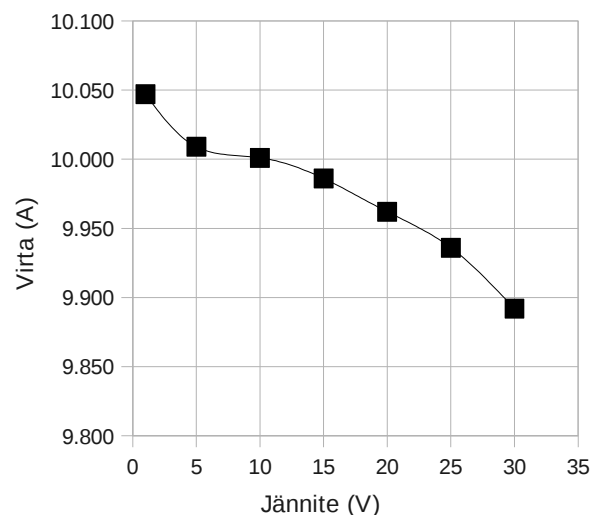
Kuva 51: Virta jännitteen funktiona, 0,1A



Kuva 52: Virta jännitteen funktiona, 1,0A



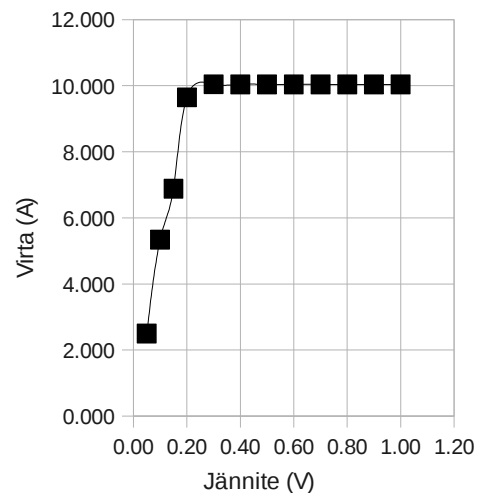
Kuva 53: Virta jännitteen funktiona, 5,0A



Kuva 54: Virta jännitteen funktiona, 10,0A

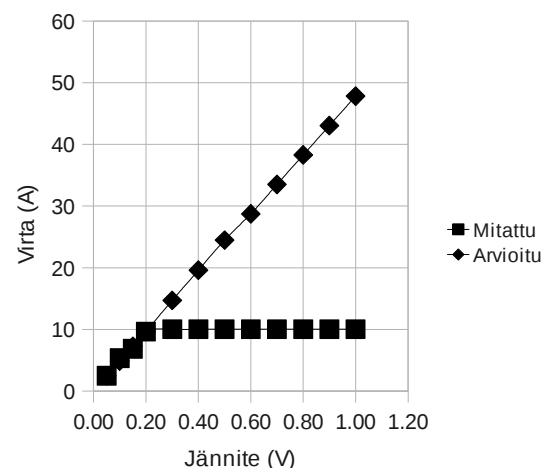
Seuraavaksi testattiin virran muutosta jännitteen funktiona. Testi suoritettiin virran arvoilla 0,1A, 1,0A, 5,0A ja 10,0A. Jokaisella virta asetettiin kohdalleen 5V kuormajännitteellä. Tämän jälkeen kuormajännitettä nostettiin askeleittain 1V alkaen 60V asti ja virran muutokset kirjattiin ylös. Tulokset on esitetty kuvissa 51, 52, 53 ja 54. Kaikista kuvista on havaittavissa virran pieni lasku jännitteen kasvaessa. Muutos on suhteellisesti suurempi pienillä virran arvoilla. Pienimmällä virran arvolla mitattaessa se oli 10mA, joka on 10% asetetusta virrasta. Vaikka suurimmalla virran arvolla mitattaessa muutos oli jo 150mA, se on kuitenkin alle 2% asetetusta virrasta. Vaikka virran muutos suuremmalla virralla kasvaa, sen osuus virran kokonaisarvosta pienenee.

Koska alustavassa määrittelyssä oli pidetty jokseenkin tärkeätä suurta virranohjauskykyä alhaisella kuormajännitteellä, myös se päätettiin mitata. Käytettävissä ei kuitenkaan tällä kertaa ollut tarpeeksi suurivirtaista säädettävää tehölähdettä, joten päätettiin tyytyä arviointiin niiden arvojen perusteella joita käytettävissä olevalla kalustolla voitiin mitata. Mittaus suoritettiin asettamalla kuormavirta 10A arvoon hieman korkeammalla kuormajännitteellä. Kuormajännitettä laskettaessa on jossain pisteessä huomattavissa muutos myös kuormavirrassa. Mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 55. Vielä 0,3V kuormajännitteellä aktiivinen kuorma ohjasi vaivatta 10A virtaa.



Kuva 55: Kuorman virta pienellä jännitteellä

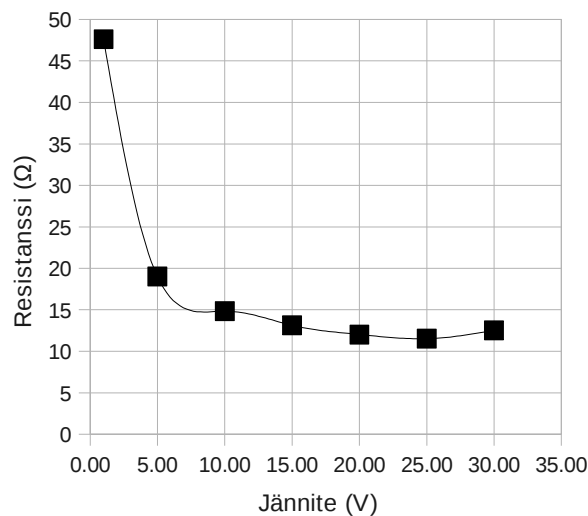
Kuvasta 55 havaitaan, kuinka virta rajoittuu jännitteen laskiessa melko lineaarisesti. Näin tapahtuu siksi että kuorma on saavuttanut minimiresistanssinsa, joka on täysin auki ohjattujen FETtien ja virranmittausvastusten muodostama. Lisäämällä pisteitä tälle suoralle päästään kuvan 56 arvioon, jonka mukaan 1,0V kuormajännitteellä aktiivinen kuorma kykenisi ohjaamaan hieman alle 50A virtaa.



Kuva 56: Arvio virrasta pienellä jännitteellä

Kun virran osalta perusominaisuudet oli selvitetty, vaihdettiin aktiivisen kuorman toimintamuoto resistiiviseen. Edellä mitatuista jännitemittauksen virhe sekä erityisesti suuri virran asetusarvon virhe vaikuttavat resistiivisen toimintamuodon suorituskykyyn. Lisäksi kiireessä tehty ja osittain testaamaton mikrokontrollerin ohjelma tukee tätä toimintamuotoa vasta perustoiminnallisuuden osalta. Hyvin pienet mitatun jännitteen ja asetetun resistanssin arvot saattavat johtaa epätarkkaan lopputulokseen. Vastaavasti hyvin suurilla arvoilla saattaa olla mahdollista jokin odottamaton ylivuoto, jolloin resistanssin arvo on aivan muuta kuin sen pitäisi olla. Tämän lisäksi säädön käyttämä kais-  
tanleveys on vielä hyvin vaatimaton, näytteitä ei oteta niin usein kuin voitaisiin eikä niiden prosessointia ole loppuun saakka optimoitu. Kun vielä huomioidaan edellä esitetyn pohjalta kuorman epätarkka toiminta hyvin pienillä virroilla ja jännitteillä, voidaan resistiivisen toimintamuodon mittaustuloksia tarkastella vähemmän kriittisesti.

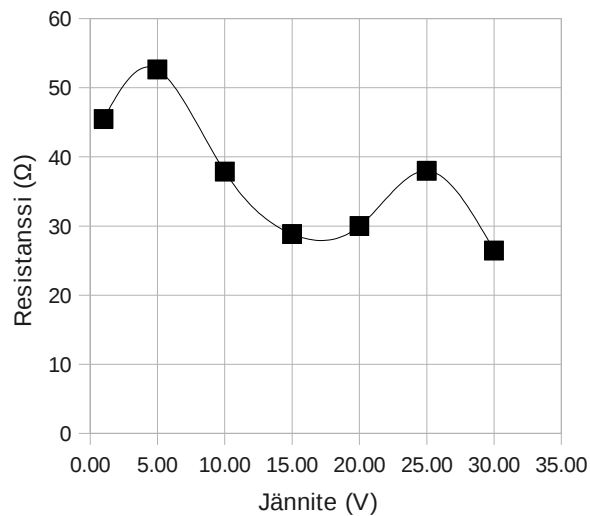
Testin ensimmäisessä osassa käytettiin laajempaa jännitealuetta ja suurempia resistanssin asetusarvoja. Mittaukset tehtiin resistanssin asetetuilla arvoilla  $10\Omega$ ,  $20\Omega$  ja  $40\Omega$ . Teholähteen jännitettä muutettiin askeleittain välillä 1-30V ja mitattiin virran arvot. Talteen otetuista jännite- ja virta-arvoista kullekin mittauspisteelle voitiin laskea aktiivisen kuorman resistanssi. Mittausten tulokset on esitetty kuvissa 57, 58 ja 59.



Kuva 57: Kuorman resistanssi,  $10\Omega$  aset

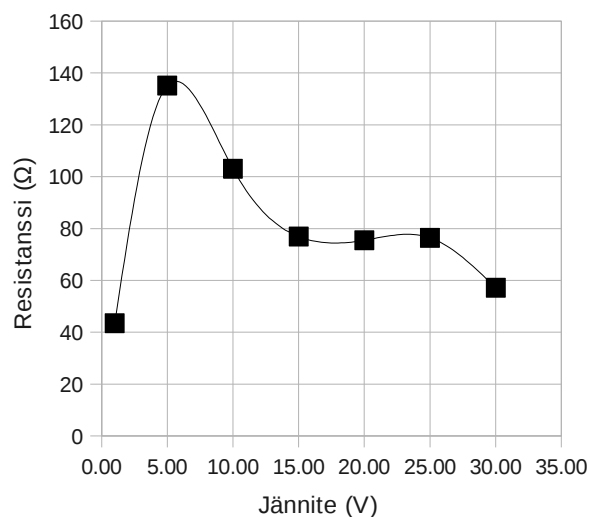
Kuorman resistanssia esittävästä kuvasta 57 voidaan todeta kuorman toimivan melko hyvin  $10\Omega$  asetusarvolla kun kuorman jännite pysyttelee yli 5 voltin. Kun muistetaan että edellä mainittu 25% virhe virran asetusarvossa vaikuttaa suoraan tämän toimintamuodon muodostaman resistanssin arvoon, tulos näyttää mielekkäämmältä. Käyrän muoto muistuttaa hyvin paljon simulaatiossa saatuja tuloksia, kuormajännitteen laskies-  
sa resistanssi kohoaa. Kuitenkin 10V ja 30V kuormajännitteiden välillä aikaan saatu resistanssi on hyvin käyttökelpoinen.





Kuva 58: Kuorman resistanssi,  $20\Omega$  asetusta

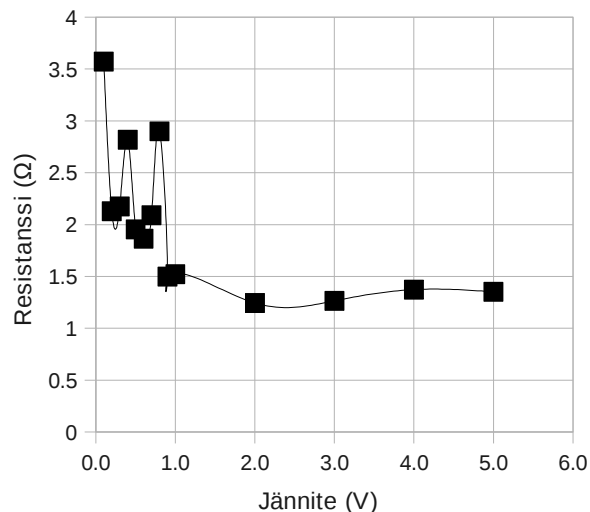
Kuvassa 58 on esitetty kuorman resistanssi jännitteen muuttuessa, asetusarvolla  $20\Omega$ . Yleinen linja on sama kuin edellisessäkin tapauksessa, korkeammalla jännitteellä resistiivinen toimintamuoto antaa parempia tuloksia. 25V kohdalla olevan linjasta poikkeavan arvon kohdalla mittaustulokset olivat epävakaita, tuntui kuin aktiivinen kuorma ei olisi aivan pysynyt toimintapisteessään. Samanlaista pientä värähtelyä oli huomattavissa muutoinkin käytettäessä resistiivistä toimintamuotoa. Vailla tarkempaa tietoa voidaan toistaiseksi asettaa suurin osa resistiivisen toimintamuodon ominaisuuksista keskeneneräisen ohjelmakehityksen viaksi.



Kuva 59: Kuorman resistanssi,  $40\Omega$  asetusta

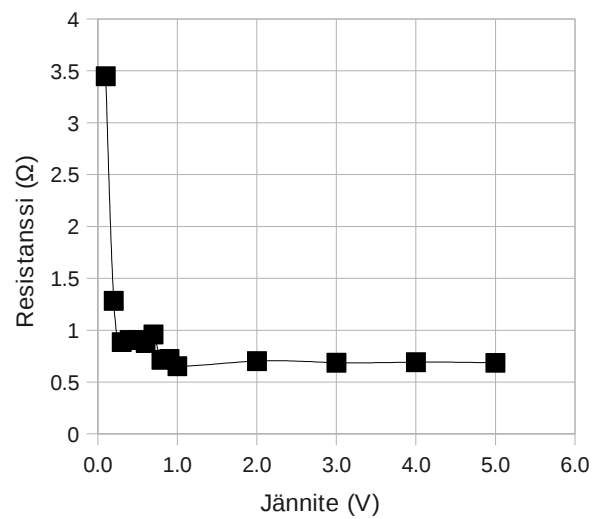
Kuvasta 59 voidaan nähdä kuorman toiminta suuremmalla resistanssin arvolla, tässä asetusravona  $40\Omega$ . Suurella resistanssin arvolla ja pienellä jännitteellä virhe on merkittävä. Edellisiä kuvia ja mittaustuloksia tutkimalla voidaan päätellä kuorman toimivan paremmin resistiivisenä kun kuormavirta on yli  $0,5\text{A}$ . Tämä oli nähtävissä jo kuvassa 57, jossa virta ylittää kyseisen arvon  $5\text{V}$  ja  $10\text{V}$  mittauspisteiden välissä.

Virran suuruusluokan vaikutus voidaan havainnoida vieläkin paremmin pienien resistanssien mittaustuloksista. Resistiivisen testin toinen puoli tehtiin arvoilla  $1\Omega$ ,  $0,5\Omega$  ja  $0,1\Omega$ . Kuormajännitettä ei voitu nostaa kovin ylös, koska käytettävissä olevat teholähde ei sitä sallinut. Mittauksen suoritettiin kuitenkin sellaisella alueella, johon teholähteen jännite- ja virtaresurssit riittivät.  $1\Omega$  ja  $0,5\Omega$  mittauksissa jännitealue on  $0,1-5\text{V}$ .  $0,1\Omega$  mittauksessa  $0,1-1,0\text{V}$ . Mittausten tulokset on esitetty kuvissa 60, 61 ja 62.



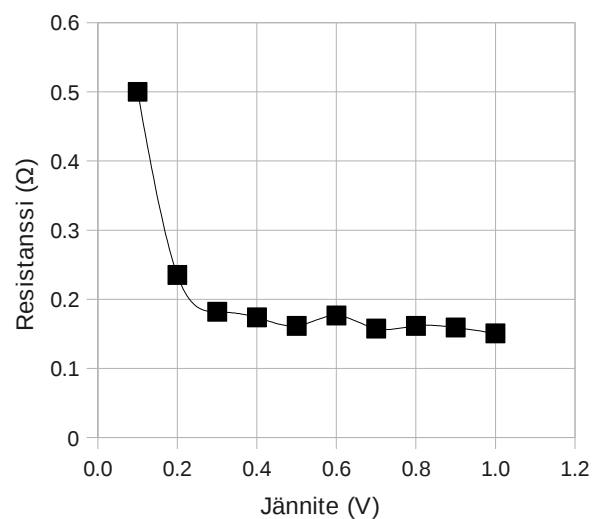
Kuva 60: Kuorman resistanssi,  $1\Omega$  asetusta

Kuten kuvasta 60 voidaan huomata, toteutettu aktiivinen kuorma toimii huomattavasti paremmin pienillä resistanssin arvoilla. Resistanssi pysyy 1-5V jännitealueella melko tasaisena, kun otetaan huomioon että pienikin virhe jännitteen tai virran mittauksessa aiheuttaa myös virheen lasketussa resistanssin arvossa. Alle  $1\text{V}$  jännitealueella resistanssin arvo alkaa nousta, kuten jo simulaatiokin ennusti. Simulaation perusteella resistiivisen toimintamuodon ei odotettu toimivan kunnolla alle  $1\text{V}$  kuormajännitteellä, joten sen toiminta näinkin hyvin  $1,0\text{V}$  jännitteeseen asti on jopa hieman yllättävää. Suurempien resistanssien kanssa havaittua epästabiiliutta esiintyi myös paikoitellen pienemmillä resistanssin arvoilla. Kuvassa 60 se näkyy aaltoiluna kuormajännitteen arvoilla  $0,1-1,0\text{V}$ .



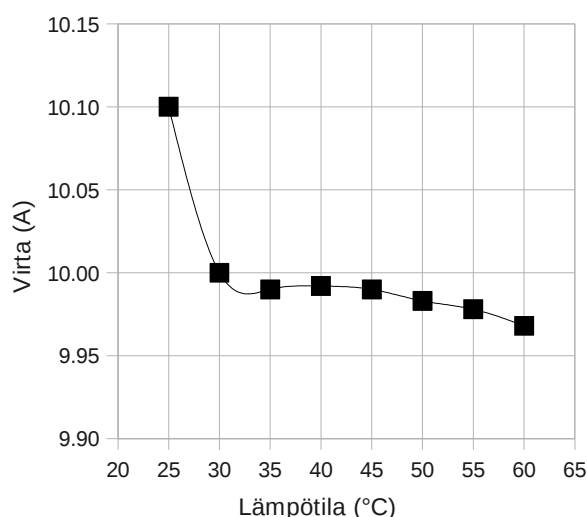
Kuva 61: Kuorman resistanssi,  $0,5\Omega$  asetus

Kuorman toiminta asetusarvolla  $0,5\Omega$  on nähtävissä kuvassa 61. Mitatuista arvioista saatu käyrä näyttää hyvältä, kun otetaan huomioon edellä luetellut epäkohdat resistiivisessä toimintamuodossa. Samoin kuvassa 62 esitetty  $0,1\Omega$  asetusarvon toiminta näyttää oikeanlaiselta. Sen pohjalta voidaan päätellä kuorman toimivan resistiivisessä toimintamuodossa myös hyvin alhaisilla kuormajännitteillä, kunhan vain kuormavirta on riittävän suuri. Voidaankin todeta aktiivisen kuorman toimivan pienillä resistanssin ja suurilla virran arvoilla riittävän hyvin tarkoitukseensa nähden.



Kuva 62: Kuorman resistanssi,  $0,1\Omega$  asetus

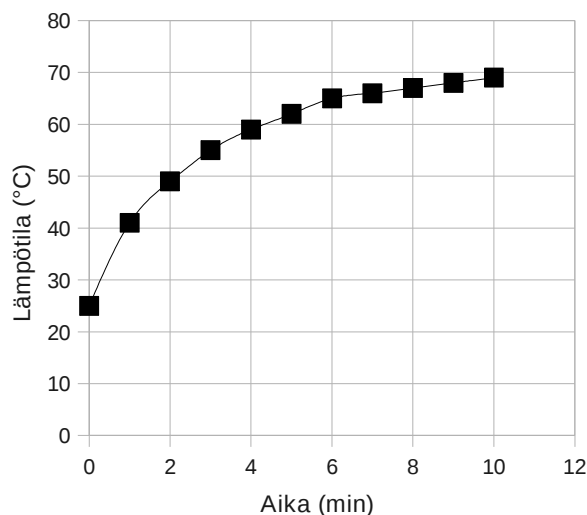
Koska kyseessä on varsin voimakkaalle lämmönvaihtelulle altistuva laite, haluttiin tietää myös virran riippuvuus lämpötilasta. Lämpötila on mitattu aktiivisen kuorman sisäisellä lämpötilamittauspiirillä, joka mittaa jäähdytyslementin lämpötilaa. Mittauksen antaman lämpötila ei ole absoluuttisen oikea, mutta se antaa hyvän kuvan lämpötilan muutoksesta. Mittauksen aikana kuormajännite oli 30V ja virta 10A, kuormitus oli siis 300W. Tulokset on esitetty kuvassa 63. Kuvassa voidaan havaita suurempi yksittäinen muutos ainoastaan 25°C ja 30°C välillä, jossa 25°C edustaa tilaa mittauksen käynnistyessä. Tämän jälkeen aktiivisen kuorman lämmitessä tapahtuu enää vähäistä muutosta. Alussa näkyvä suurempi muutos johtuu mahdollisesti virranmittausvastusten lämmön noususta.



*Kuva 63: Lämpötilan vaikutus virtaan*

Kuormitusta testattiin asettamalla kuormajännitteeksi 30V ja virraksi 10A, saaden kuormitukseksi 300W. Aktiivinen kuorma jätettiin toimimaan valitulla kuormituksella joksikin aikaa ja seurattiin jäähdytyslementin lämpötilaa. Mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 64. Tuloksista havaitaan lämpötilan kohoavan alussa nopeammin, mutta hiljalleen vakiintuvan lähestyttäessä 70°C lämpötilaa. Tämän pohjalta voidaan sanoa lämpötilan olevan 300W kuormituksella hallinnassa. Toteutettu aktiivinen kuorma voisi mahdollisesti toimia jatkuvasti suuremmallakin kuormituksella, mutta sitä ei tällä kertaa testattu. Hetkellinen kuormitus voi olla hyvin paljon suurempi, kunhan FETtien raja-arvoja ei ylitetä eikä laitteen lämpötilan anneta nousta liian korkealle.

Samalla todennettiin myös lämpötilan mittauksen ja puhaltimen nopeuden säädön toimivuus. Ne toimivat vaikka ohjelmaan olikin jäänyt pieni ominaisuus joka nostaa puhaltimen nopeutta myös alle 20°C lämpötilassa. Jäähdytyslementissä on myös kuumempia kohtia kuin mitattu lämpötila, mutta se ei tässä yhteydessä ole oleellista. Mitattu tieto riittää hyvin suojauksen toteuttamiseen ja puhaltimien ohjaukseen.



Kuva 64: Lämpötila 300W kuormituksella

Myös dynaamista toimintamuotoa testattiin. Testausjärjestelyssä teholähteen paluujohtoon asennettiin  $0,033\Omega$  vastus virran mittaukseen. Virtaa mitattiin oskilloskoopilla, jolloin nähtiin samalla virran aaltomuoto. Teholähteen jännitteeksi asetettiin 12V ja aktiivisen kuorman virtatasoiksi noin 10A ja 1A. Testaus aloitettiin 0,1ms jaksonajalla ja 50% pulssisuhteella. Näillä arvoilla virran lasku ja nousuaikoja kyettiin säätämään 10 $\mu$ s askelin välillä 50-250 $\mu$ s. Ajat pysyvät melko lailla samoina, vaikka kuorman jännitettä, virran asetusarvoa tai toimintataajuutta muutetaan. Virran nousunopeus riippuu siis asetettujen virtojen erotuksesta ja valitusta nousuajasta.

Suoritettujen mittauksien jälkeen laite purettiin tutkimuksia varten, koska virran asetusarvon suuri epätarkkuus vihjasi vioittumisesta. Havaittiin että aiemmin korjatussa pääteasteessa FETin jalat oli juotettu kiinni piirilevyyn vain toiselta puolelta. Läpikuparoimattomalla levyllä tämä johti tilanteeseen jossa yksi jalka ei ollut sähköisesti kiinni missään. Myöhemmin uuden korjauksen jälkeen laitetta kokeiltiin ja virran asetusarvossa ollut suuri virhe oli pienentynyt ratkaisevasti. Saatujen tuloksia katsottaessa on otettava huomioon, että niistä suurin osa on saatu 5/6 pääteastekapasiteetilla. Vaikka 300W kuormitustesti on esitetty viimeisenä, se tehtiin jo ensimmäisellä mittauskerralla. 1,0V kuormajännitteelle arvioitu virta puolestaan on liian alhainen, koska se on saavutettu viidellä pääteasteella. Myös resistiivisen toimintatilan mittauksiin on oleellisesti vaikuttanut yhden pääteasteen puuttuminen, sillä se vaikuttaa suoraan virran asetusarvon kautta resistanssin arvoon. Kuorman jatkuvaksi tehonkestoksi on määritelty konservatiivisesti 300W. Arvoon päädyttiin koska se on suurin jatkuva kuormitus jolla kuormaa enätettiin testata.

## 6.2 Yhteenveto

Mittausten ja suunnittelulla taattujen ominaisuuksien pohjalta koottiin aktiiviselle kuormalle lyhyt määrittely

Kuormajännite	: 0-60V
Kuormavirta	: 0-60A
Kuormavirta @1V	: >50A
Tehohäviö	: 300W jatkuva, 600W hetkellinen
Käyttöjännite	: 88-264Vac 125-373Vdc
Toimintatilat	: CC, CR, Dynaaminen (CC)
CC säätöalue	: 0-60A
CC resoluutio	: 0,0015A
CR säätöalue	: 0,001-40ohm
CR resoluutio	: 0,001ohm
Dynaaminen tila	
jaksonaika säätöalue	: 0,020-130,560ms
jaksonaika säätöresoluutio	: 0,001ms
pulssisuhteen säätöalue	: 1-100%
pulssisuhteen säätöresoluutio	: 1%
nousuajan säätöalue	: 50-250µs, 10µs askelin

Virran ja jännitteen mittaus toimivat melko hyvin, vaikka mittausalueiden laidoissa virhe hieman kasvaakin. Hieman tarkastelemalla käytettyä kytkentää ja mikrokontrollerin ohjelmaa, voitaisiin saada vieläkin parempia tuloksia. Suurimmassa osaa aktiivisen kuorman toiminta-aluetta mittaukset ovat kelvollisia.

Virtakuormana toimiessaan suunniteltu ja toteutettu aktiivinen kuorma toimii kohdullisen hyvin. Hyvin pienellä kuormavirralla toiminta ei ole yhtä sujuvaa kuin suurella, mutta kuitenkin riittävän hyvää. Virran asetusarvon ja todellisen arvon välinen suuri virhe on todennäköisesti korjattavissa, vaikka sitä ei tämän työn puitteissa enää ehdittykään tehdä. Siksi sitä ei lueta viaksi, ainoastaan ominaisuudeksi joka korjaantuu myöhemmässä vaiheessa laitteen kehitystä. Aktiivinen kuorma kuitenkin pitää asetetun virran vakaana kuormajännitteen ja laitteen lämpötilan vaihdellessa.

Aktiivisen kuorman toimiessa resistiivisessä toimintamuodossa ei aivan päästy alussa toivottuihin tuloksiin. Siitä huolimatta toteutetulla laitteella on kyetty todentamaan toimintaperiaatteen käyttökelpoisuus. Jatkokehittelyllä resistiivinen toimintamuoto on mahdollista saada toimimaan paremmin laajemmalla alueella. Samoin on mahdollista lisätä laitteeseen vakiotehon toteuttava toimintamuoto. Näitä ei kuitenkaan tämän työn puitteissa ole resursseja tarkastella enempää, vaan ne jätetään laitteen mahdollisesti jatkuvan kehityksen tavoitteiksi.

Dynaaminen toimintamuoto toimii siinä laajuudessa, kuin sen alustavan määrittelyn mukaan pitikin. Myös alustavassa määrittelyssä lähinnä toivomuksen tasolle jätetty nousuajan säätö toimii myös. Aktiivinen kuorma tukee toistaiseksi vain vakiovirtamuotoa, mutta käy kuitenkin useimpiin sovelluksiin. Vaikka ominaisuuksia ei ole hiottu loppuun saakka eikä laitteen ohjelma käytä kaikkia laitteiston tarjoamia mahdollisuuksia, se soveltuu hyvin sille tarkoitettuun käyttöön. Toteutetulla aktiivisella kuormalla voidaan testata teholähteitä staattisessa ja dynaamisessa tilassa.

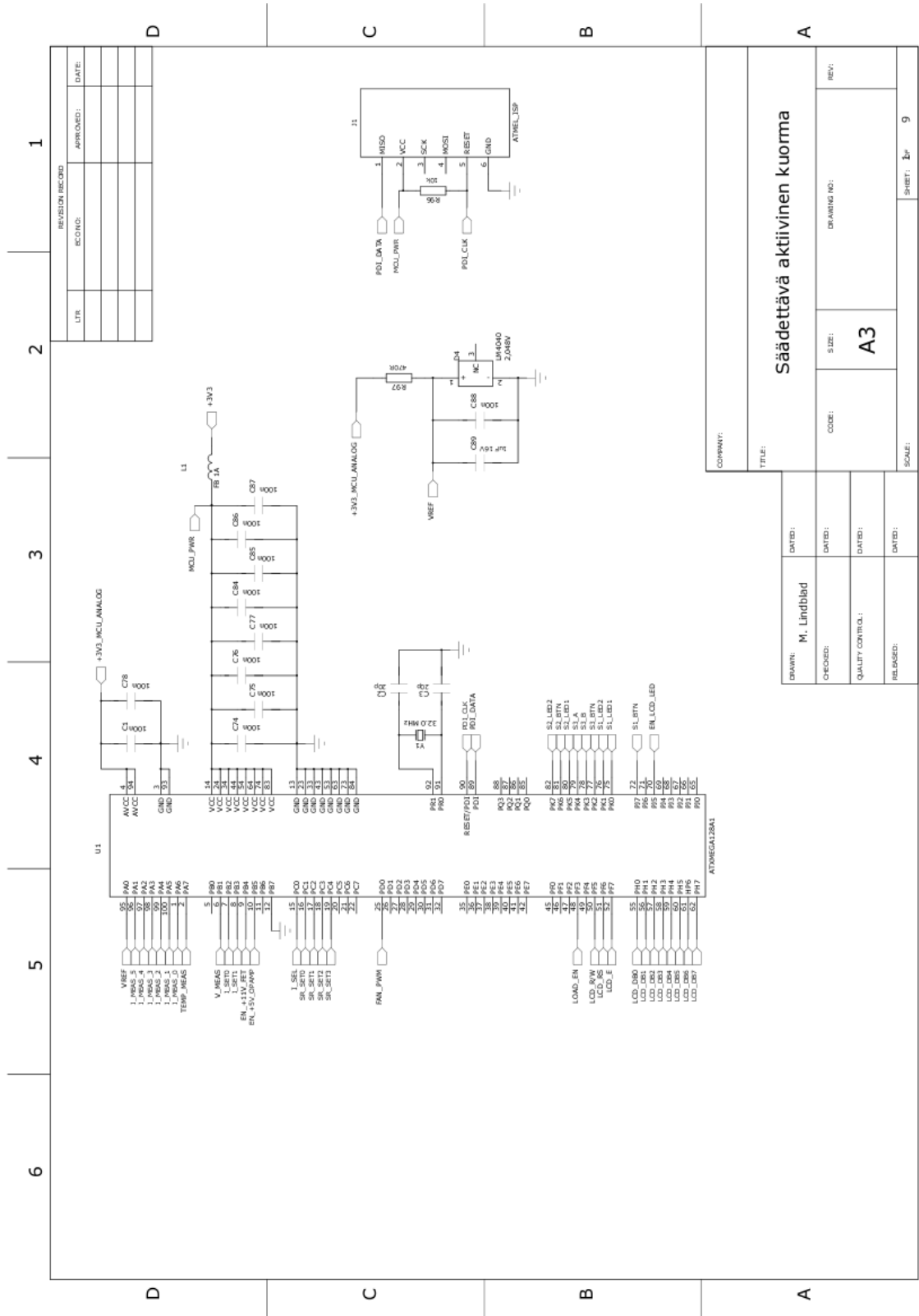
Suunniteltu ja toteutettu aktiivinen kuorma toteuttaa suurimmilta osin määrittelynsä, joiltain osin jopa ylittää sen. Koska kyseessä on prototyyppiä vastaava laite, ei sillä ole tavoiteltukaan vielä täydellistä toimivuutta. Tärkeämpää on laitteen suunnittelusta ja toteutuksesta saatu kokemus, jota voidaan tulevaisuudessa käyttää laitteen seuraavaa versiota tai muuta vastaavaa laitetta suunniteltaessa. Tältä pohjalta tarkasteltuna voidaan sanoa suunnitellun ja toteutetun aktiivisen kuorman onnistuneen tarkoituksessaan. Laite sekä ominaisuuksiensa että toiminnallisuutensa puolesta soveltuu siihen ensisijaiseen tehtäväänsä, sitä voidaan käyttää teholähteiden testaukseen. Testauksesta saatavaa käyttökokemusta voidaan käyttää mahdollista seuraavaa versiota kehitettäessä.

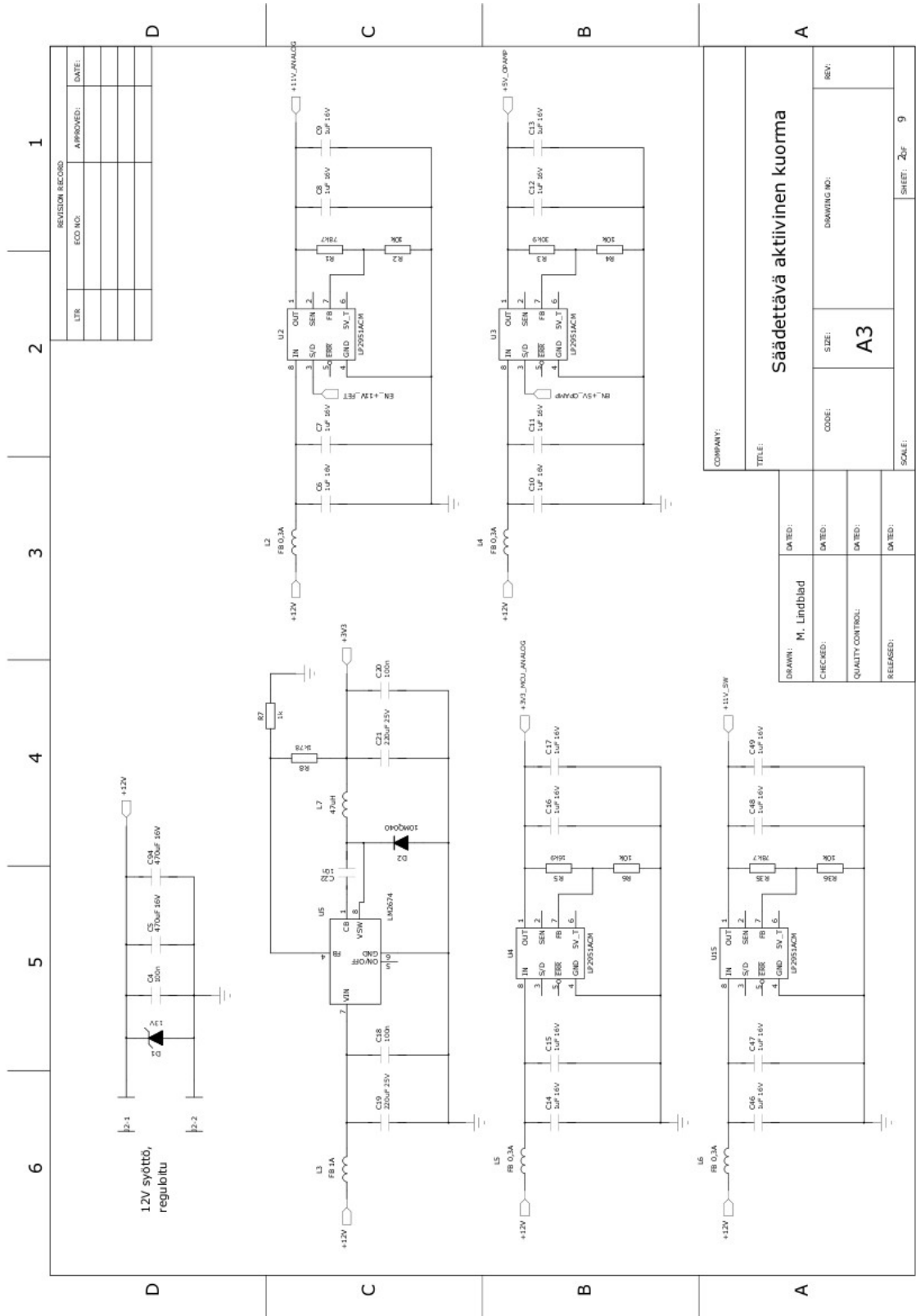
## Lähteet

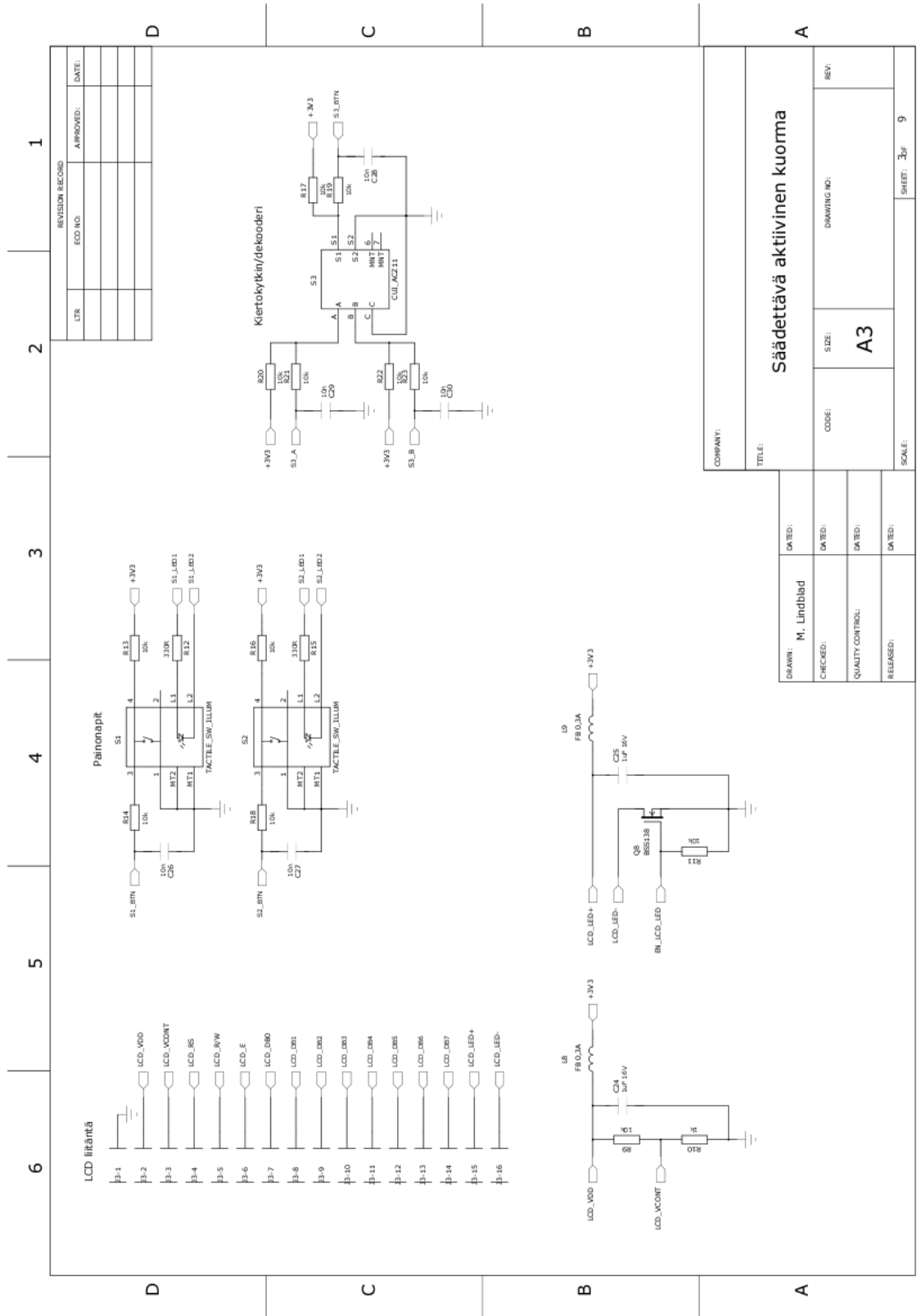
- [1] Laplante, P. Electrical engineering dictionary. 2000. CRC Press. 772 p.
- [2] Coombs, Clyde F. Jr. Electronic instrument handbook. 1995. McGraw-Hill.
- [3] Harrison, Linden T. Current sources & voltage references. 2005. Elsevier / Newnes, 603p.
- [4] Ritchie, G. J. Transistor circuit techniques. 1993. Chapman & Hall/CRC. 233p.
- [5] Brown, Marty. Power supply cookbook. 2001. Elsevier / Newnes, 265p.
- [6] DC Electronic Load Applications and Examples, Application note. BK Precision. 17p.
- [7] Nilsson, James W., Riedel, Susan A. Electric circuits. 2000. Prentice Hall. 1030p.
- [8] Pulsed characterization of power semiconductors using electronic loads, application note AN 1246 . Agilent. 17p.
- [9] Programmable DC electronic load, model 6310A series, technical specification. 2009. Chroma ATE. 8p.
- [10] Agilent DC electronic loads, models N3300A-N3307A , technical specification. 2002. Agilent. 10p.
- [11] DC electronic load, model 8540, datasheet. 2008. B&K Precision. 1p
- [12] LD300 electronic DC load, technical specification. 2004. Thurlby Thandar Instruments. 4p
- [13] Korpela Aki. SMG-4450, Aurinkosähkö, luentokalvot. 2009. Tampereen teknilinen yliopisto, Elektronii kan laitos.
- [14] Prismatic Li-ion battery H083448, datasheet. 2004. PowerStream. 3p.

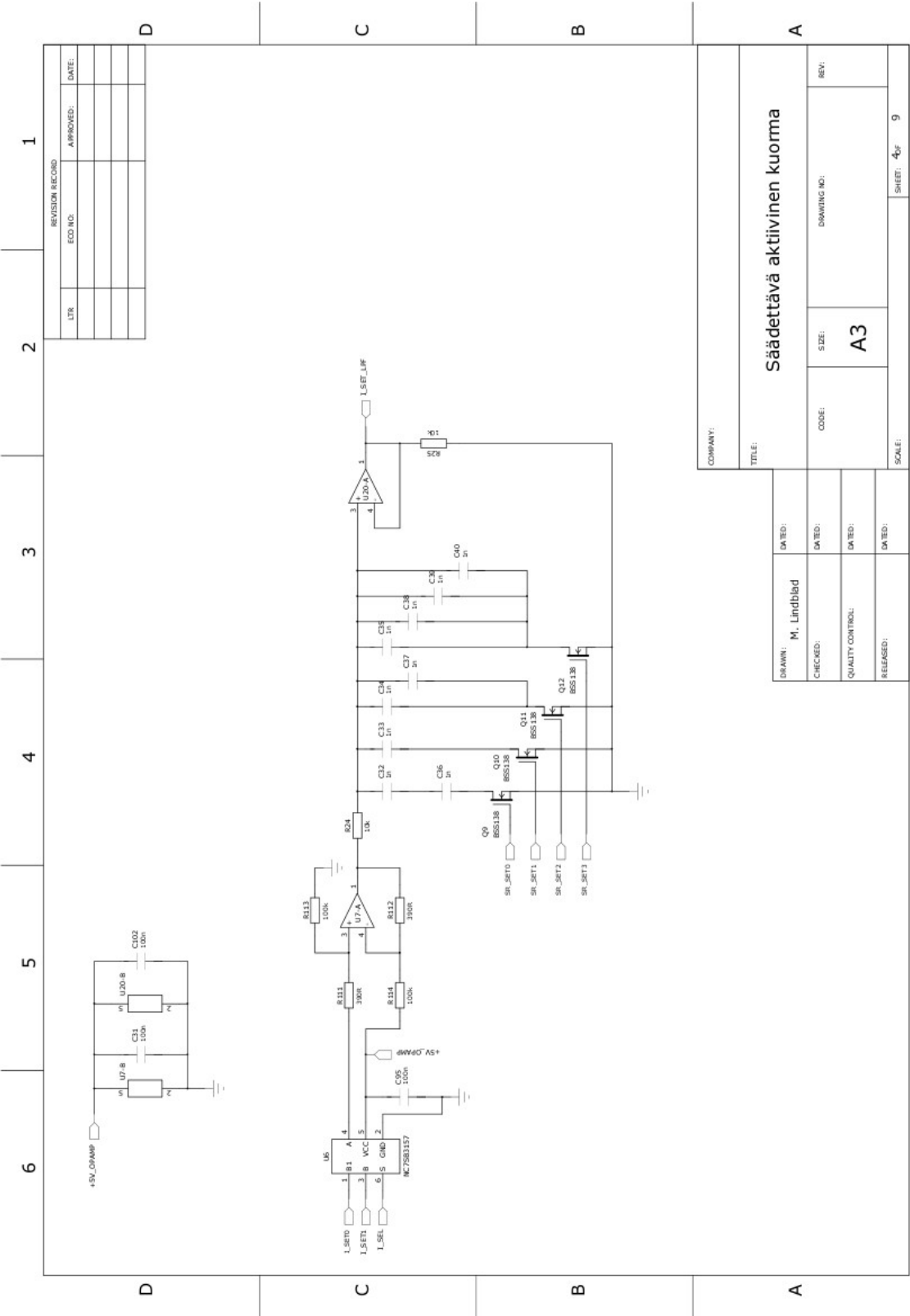


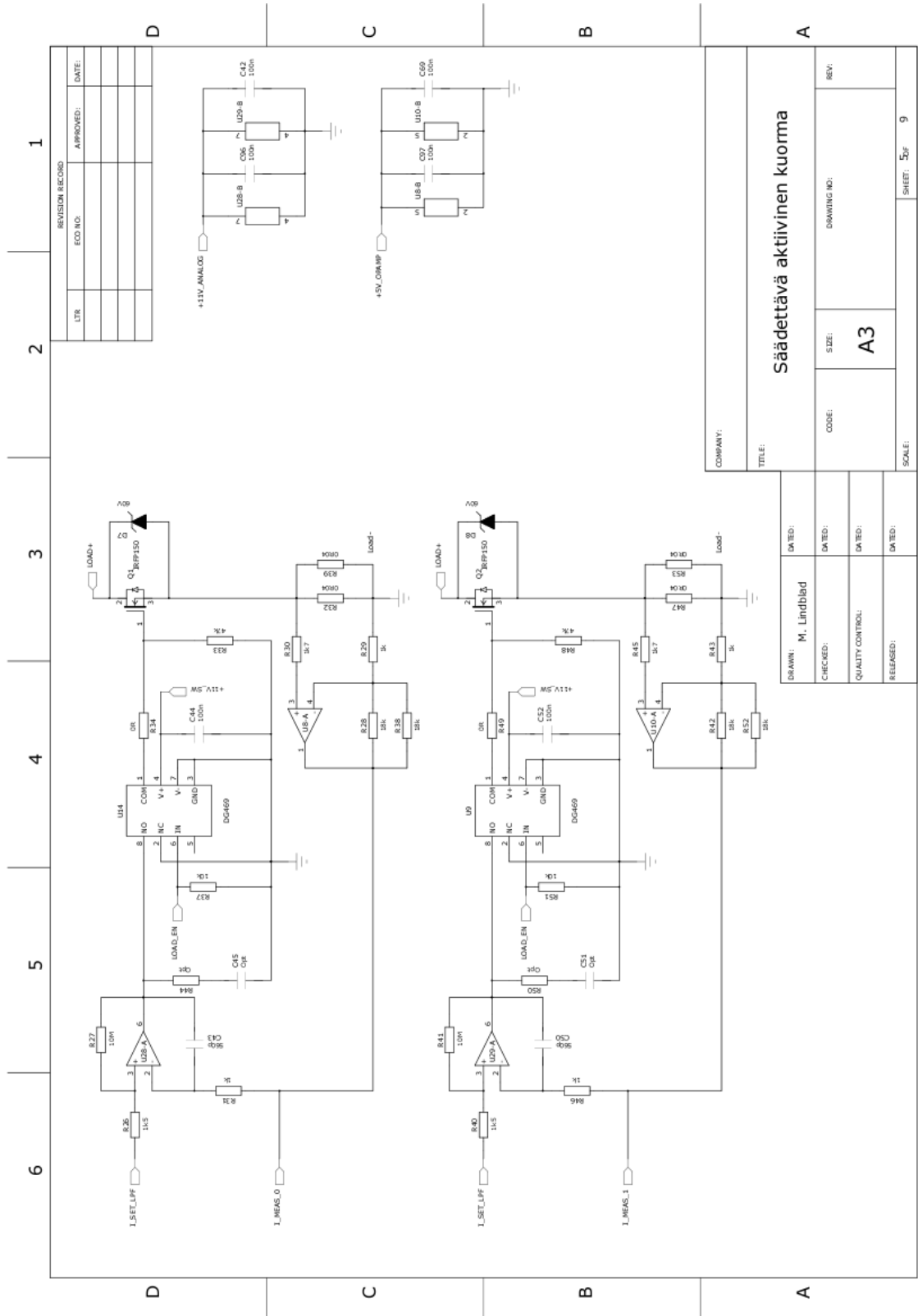
## Liite I, Piirikaavio

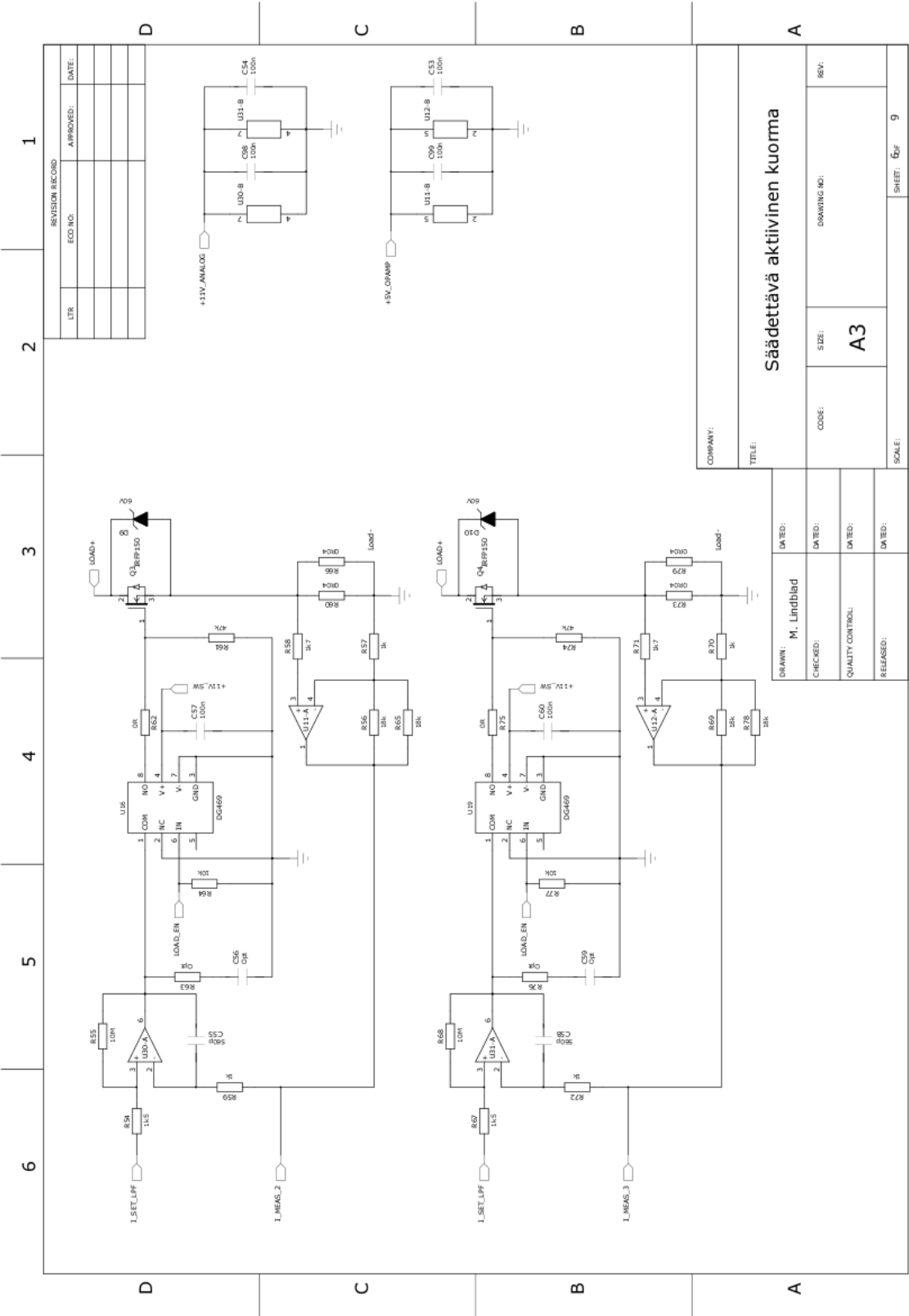


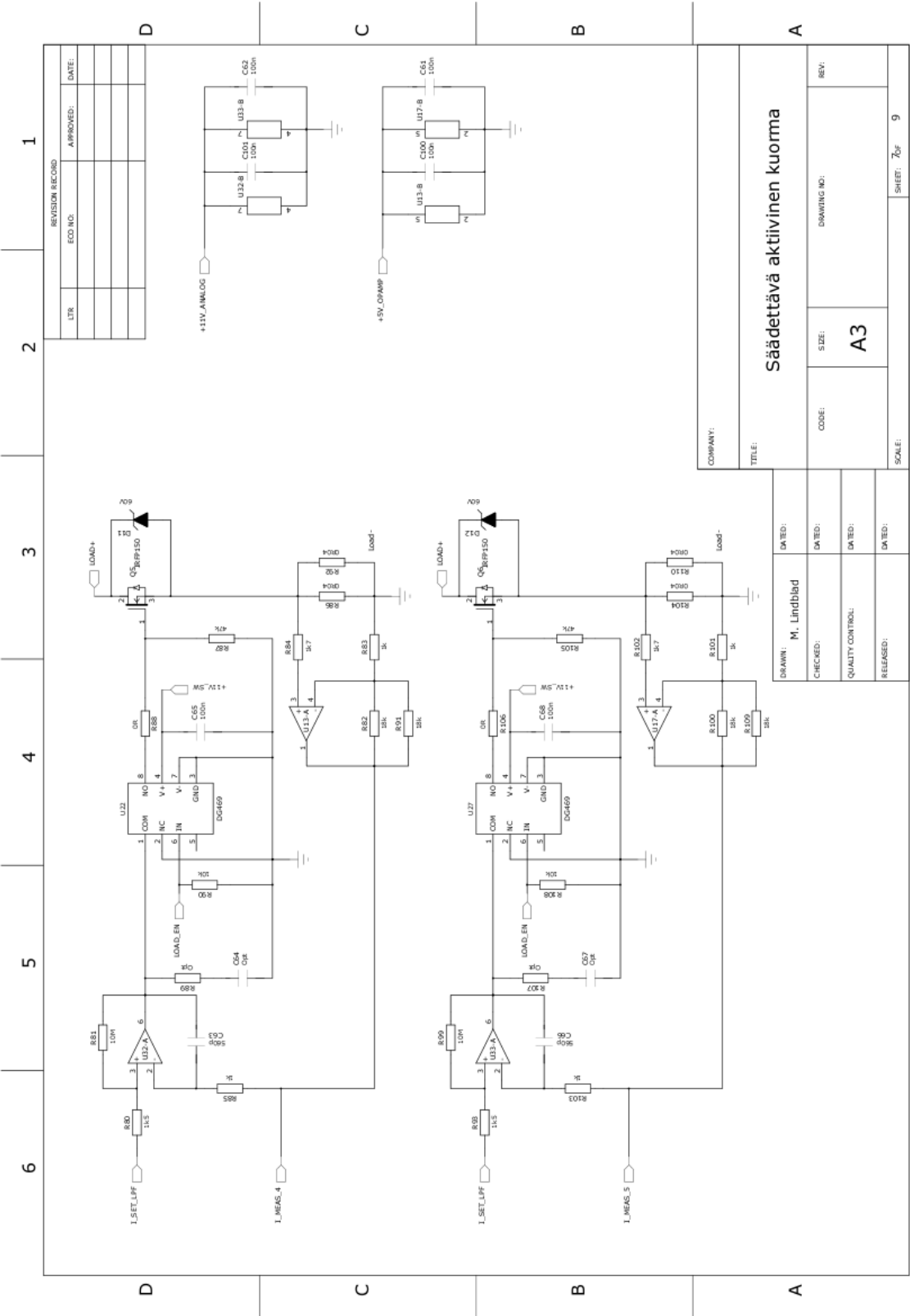


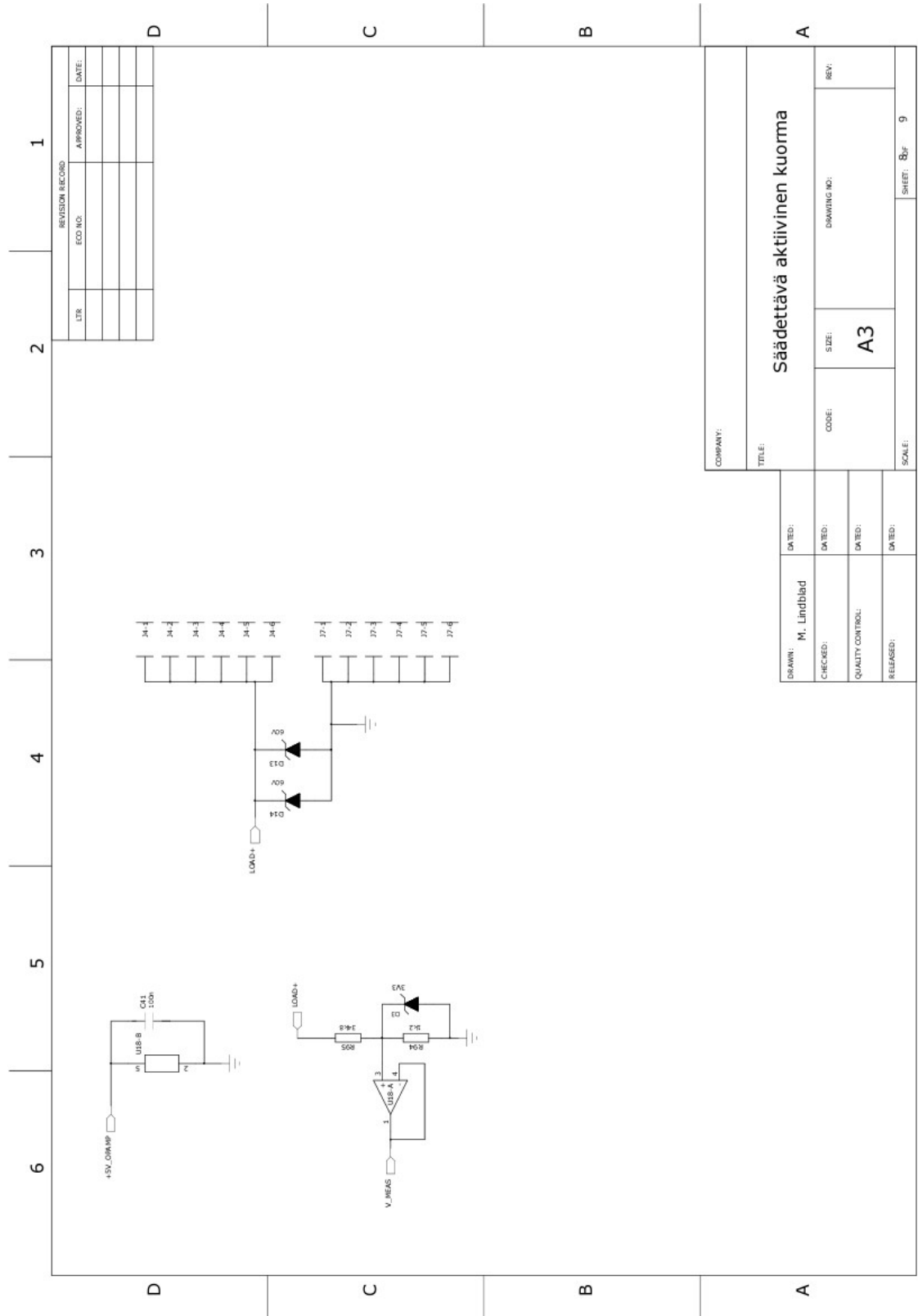




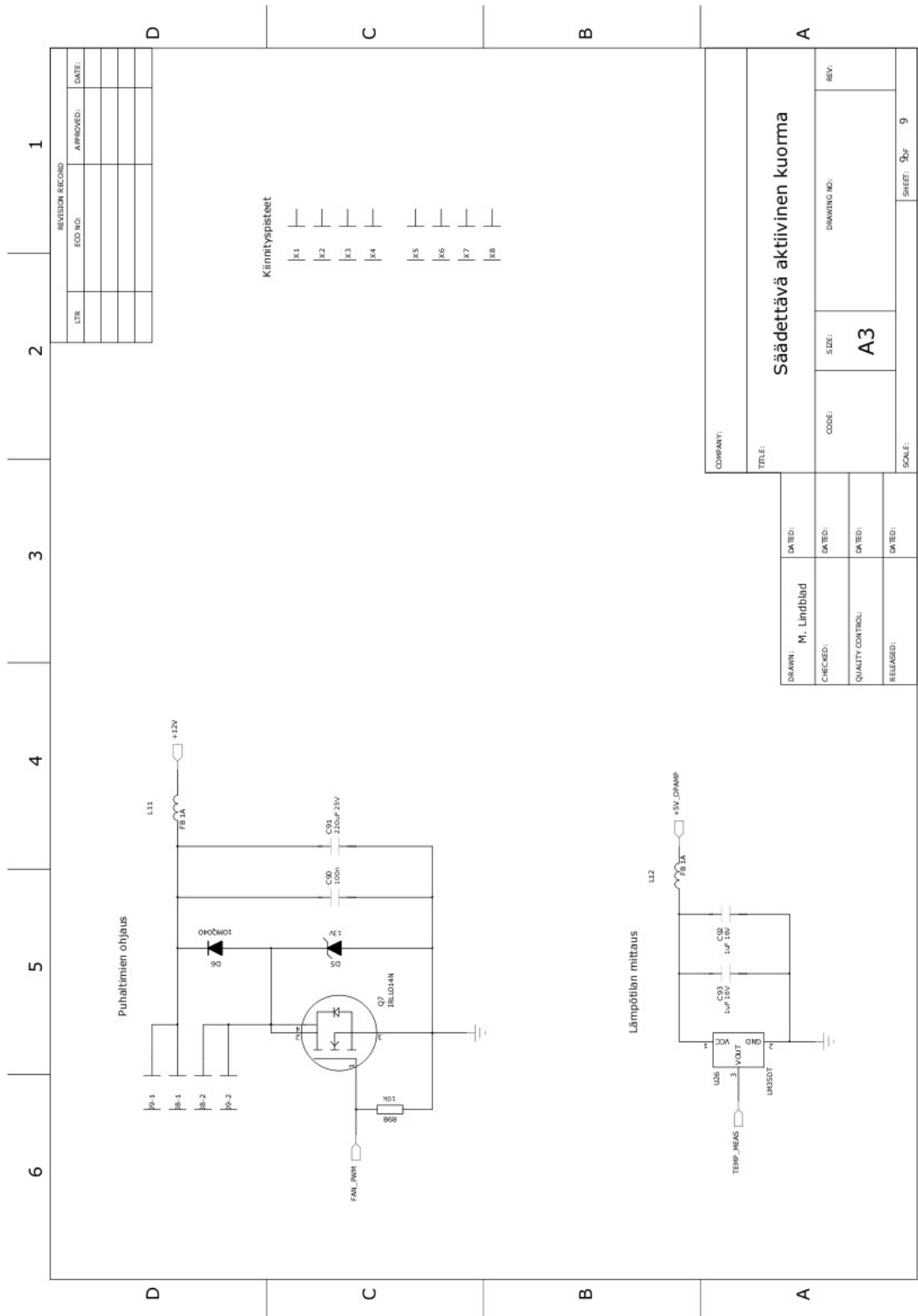






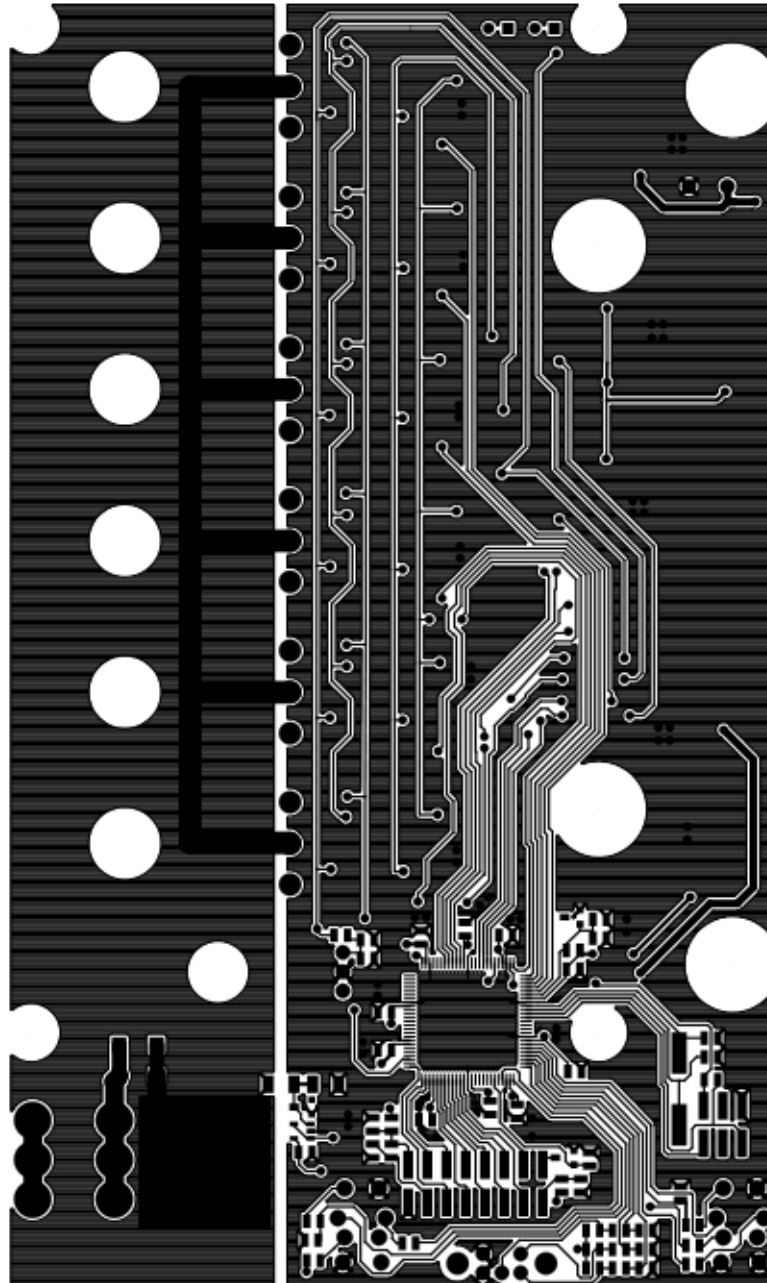




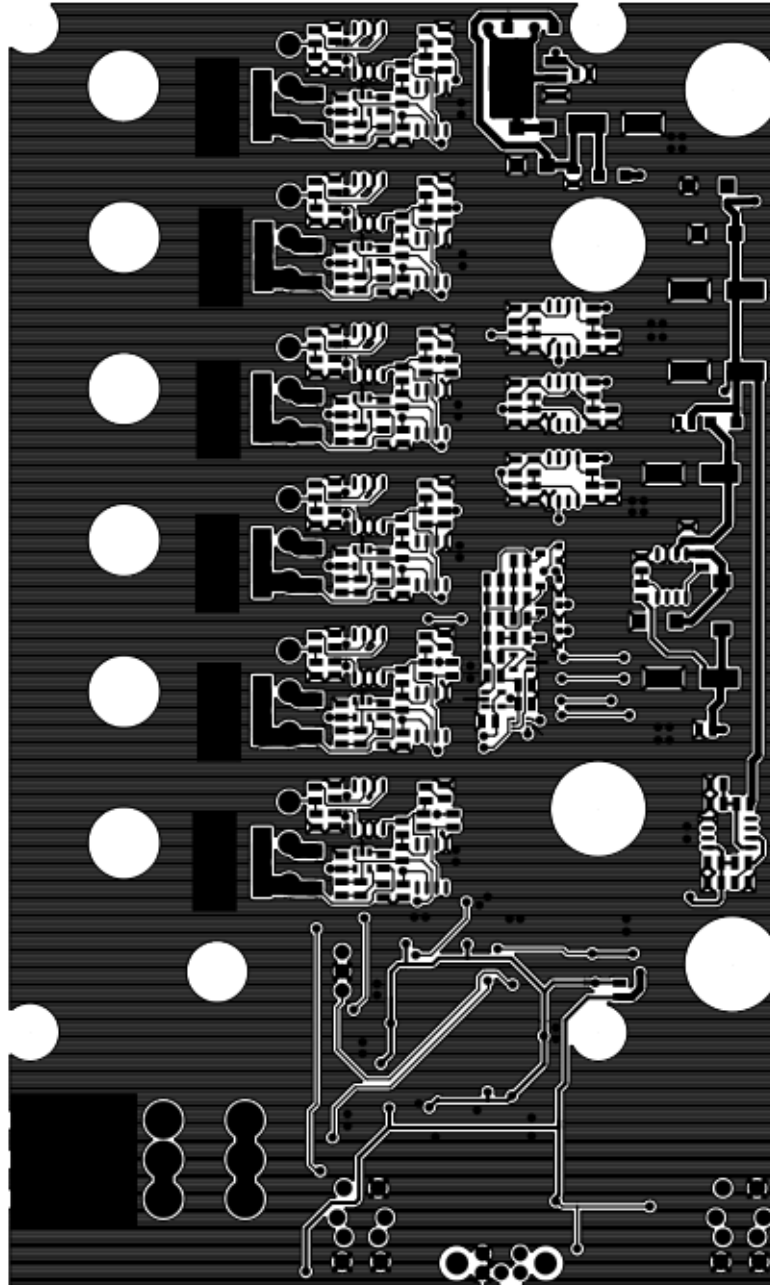


## Liite II, Piirilevy

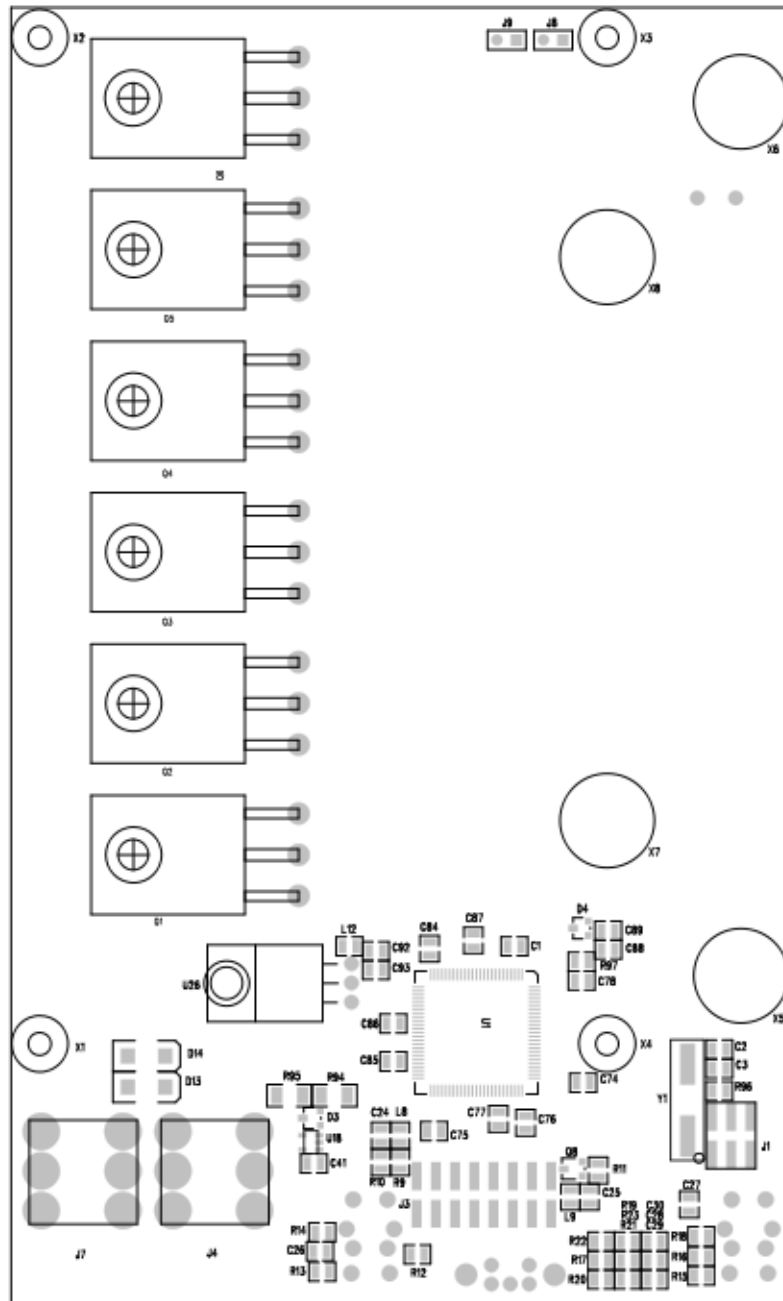
Kupari, yläpuoli.



Kupari, alapuoli.

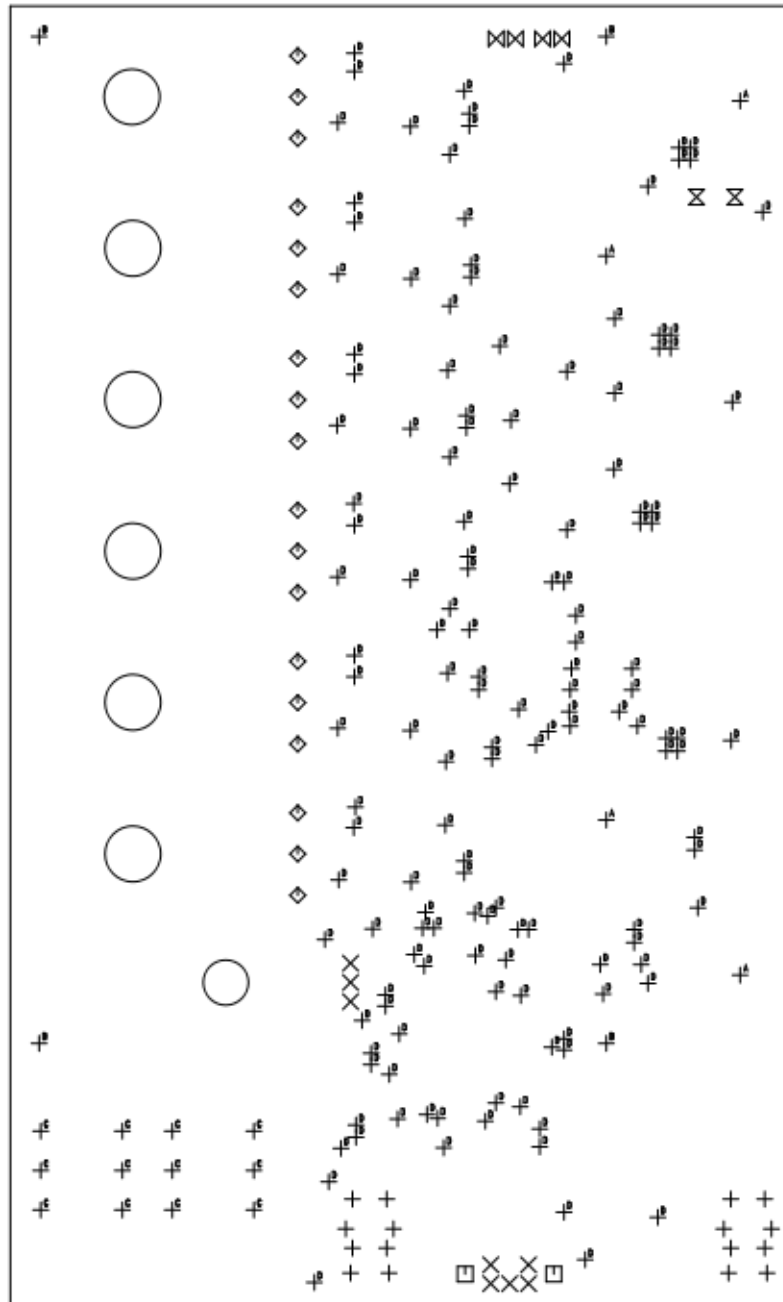


Ladonta, yläpuoli.





Poraus, yläpuolelta.



SIZE	QTY	SYM	PLATED	TOL
1.2	16	+	YES	+/-0.0
1	8	×	YES	+/-0.0
2	2	□	YES	+/-0.0
1.4	18	◇	YES	+/-0.0
1.25	2	⊠	YES	+/-0.0
0.889	4	⊠	YES	+/-0.0
9.5	4	⊕ <sup>A</sup>	NO	+/-0.0
3.2	4	⊕ <sup>B</sup>	NO	+/-0.0
2.6	12	⊕ <sup>C</sup>	YES	+/-0.0
0.6	147	⊕ <sup>D</sup>	YES	+/-0.0

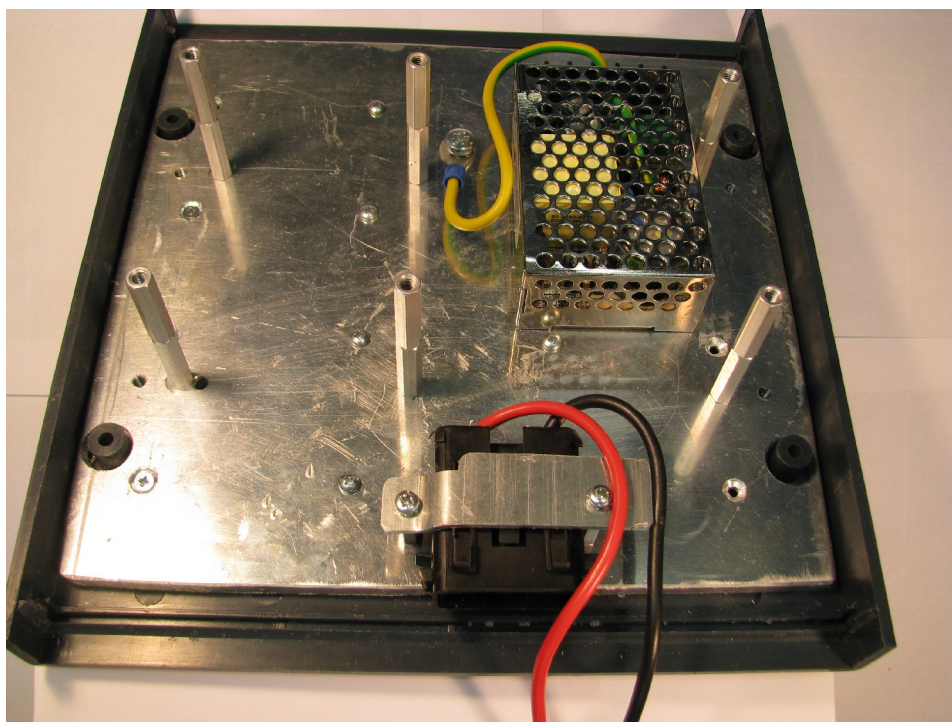
## Liite III, Osalista

Item	Qty	Reference	Komponentti	Arvo	Kuvaus
1	37	C1 C4 C18 C20 C31 C41-42 C44 C52-54 C57 C60-62 C65 C68-69 C74-78 C84-88 C90 C95-102		100n	Kerko, 0805
2	9	C39-40 C32-38		1n	Kerko, 0805
3	16	C48-49 C9-17 C6-8 C46-47		1uF 16V	Kerko, 0805
4	6	C64 C51 C67 C59 C45 C56		Opt	Kerko, 0805
5	3	C19 C21 C91		220uF 25V	Hakkurielko
6	6	C22 C26-30		10n	Kerko, 0805
7	3	C25 C89 C24		1uF 16V	Kerko, 0805
8	2	C2-3		20p	Kerko, 0805
9	2	C5 C94		470uF 16V	Hakkurielko
10	6	C50 C43 C55 C58 C66 C63		560p	Kerko, 0805
12	2	R1 R35		78k7	Vastus, 0805
13	1	R3		30k9	Vastus, 0805
14	20	R4 R6 R9 R11 R13-14 R16-25 R2 R36 R96 R98		10k	Vastus, 0805
15	2	R12 R15		330R	Vastus, 0805
16	6	R26 R40 R54 R67 R80 R93		1k5	Vastus, 0805
17	12	R32 R39 R47 R53 R60 R66 R73 R79 R86 R92 R104 R110		0R04	Vastus, 0805
18	6	R44 R50 R63 R76 R89 R107		Opt	Vastus, 0805
19	6	R45 R58 R71 R30 R84 R102		1k7	Vastus, 0805
20	12	R56 R65 R69 R52 R38 R78 R82 R28 R91 R100 R42 R109		18k	Vastus, 0805
21	6	R68 R81 R27 R41 R99 R55		10M	Vastus, 0805
22	6	R74 R61 R33 R87 R48 R105		47k	Vastus, 0805
23	1	R5		16k9	Vastus, 0805
24	6	R51 R77 R90 R64 R37 R108		10k	Vastus, 0805
25	6	R62 R88 R75 R34 R106 R49		0R	Vastus, 0805
26	14	R31 R10 R7 R72 R57 R101 R103 R85 R83 R46 R59 R70 R29 R43		1k	Vastus, 0805
27	1	R94		1k2	Vastus, 0805
28	1	R97		470R	Vastus, 0805
29	1	R95		34k8	Vastus, 0805

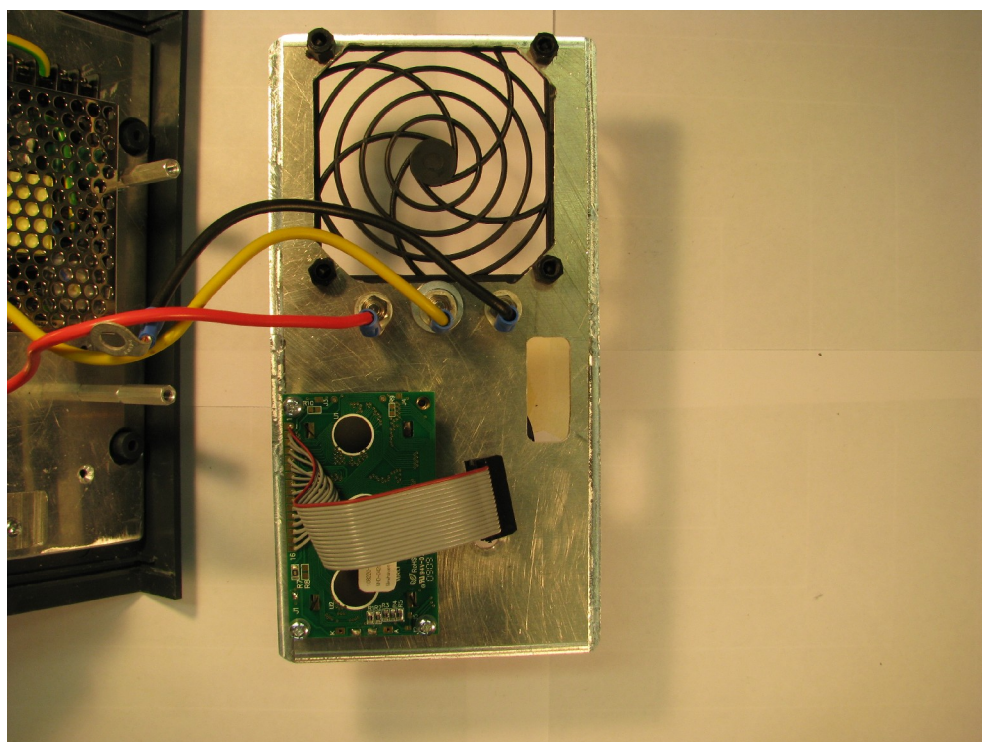
Item	Qty	Reference	Komponentti	Arvo	Kuvaus
30	1	R8		1k78	Vastus, 0805
31	2	R111-112		390R	Vastus, 0805
32	2	R113-114		100k	Vastus, 0805
33	1	Y1		32.0 MHz	Kide
34	2	D2 D6	10MQ040		Diodi, Schottky 2,1A 40V
36	1	S3	ACZ11		Kiertonuppi
37	9	U7-8 U10-13 U17-18 U20	AD8601		Single OPAMP
38	1	U1	ATXMega128A1		Mikrokontrolleri
39	5	Q8-12	BSS138		N MOSFET
40	1	D3	BZX84C3V3	3V3	Zener
41	2	C92-93	CL21x105	1uF 16V	Kerko, 0805
42	1	L7	DE0704-47	47uH	Kuristin
43	4	U16 U19 U22 U27	DG469		Analogiakytkin
44	2	U9 U14	DG469		Analogiakytkin
45	6	L2 L4-6 L8-9	FB 0,3A		Pienoiskuristin, 0,3A
46	4	L1 L3 L11-12	FB 1A		Pienoiskuristin, 1A
47	6	Q1-6	IRFP150		N MOSFET
48	1	Q7	IRLL014N		N MOSFET
49	2	J4 J7	Keystone 7808		Terminaali, M5
50	1	U5	LM2674		Hakkuriregulaattori, 260kHz , 5V 1A
51	4	U2-4 U15	LM2951ACM		Regulaattori, LDO
52	1	U26	LM35DT		Tämpötila-anturi
53	1	D4	LM4040	2,048V	Jännitereferenssi
54	2	J8-9	Molex KK 7395,		Liitin, 2,54mm rasteri
55	1	U6	NC7SB3157		Analogiakytkin
56	6	U28-33	OP162		Single OPAMP
57	1	J1	P2x3_SMD		Piikkirima, SMD 2x3
58	1	J3	P2x8		Piikkirima 2x8
59	2	D1 D5	P6SMBJ13	13V	TVS, yksisuuntainen
60	2	S1-2	PB6156RSL-13102		Painokytkin + 2x LED
61	1	J2	RL2		Ruuviliitin 2-os
62	8	D7-14	SMDJ60	60V	TVS, yksisuuntainen



## Liite IV, Valokuvia

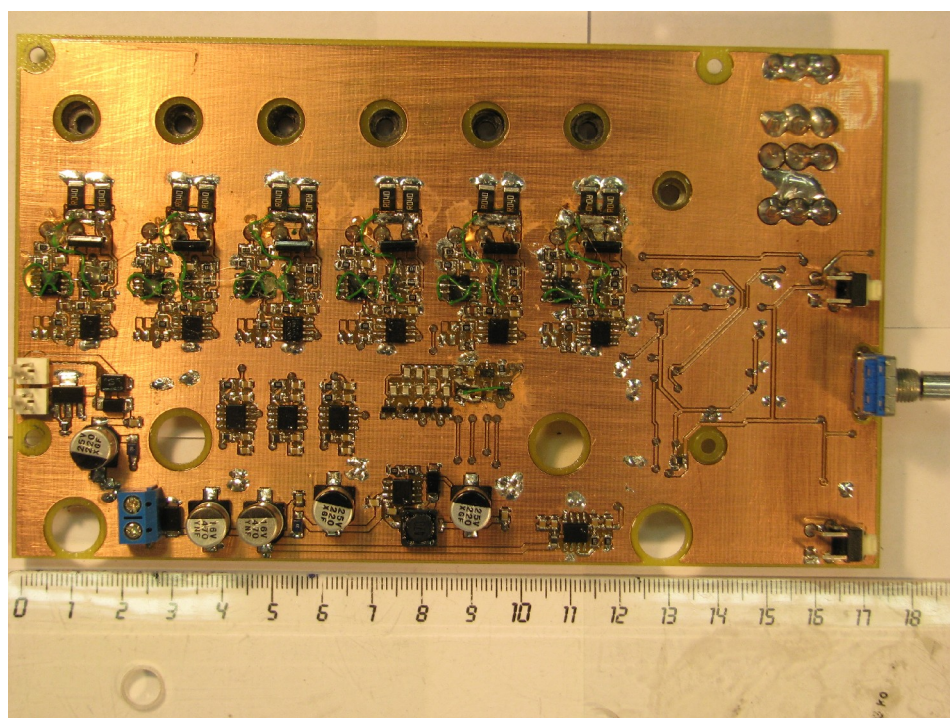


Valokuva 1: Pohjalevy, teholähde ja sulakkeenpidin kiinnitettyinä kotelon pohjaan.

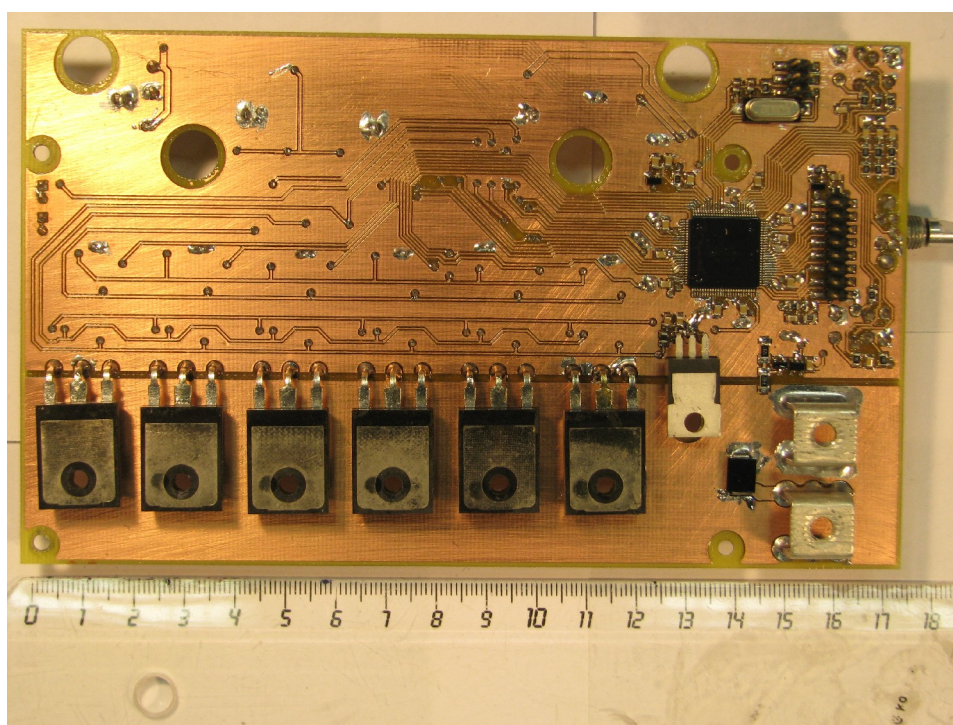


Valokuva 2: Etupaneeli sisältä, näyttö ja liittimet asennettuna.



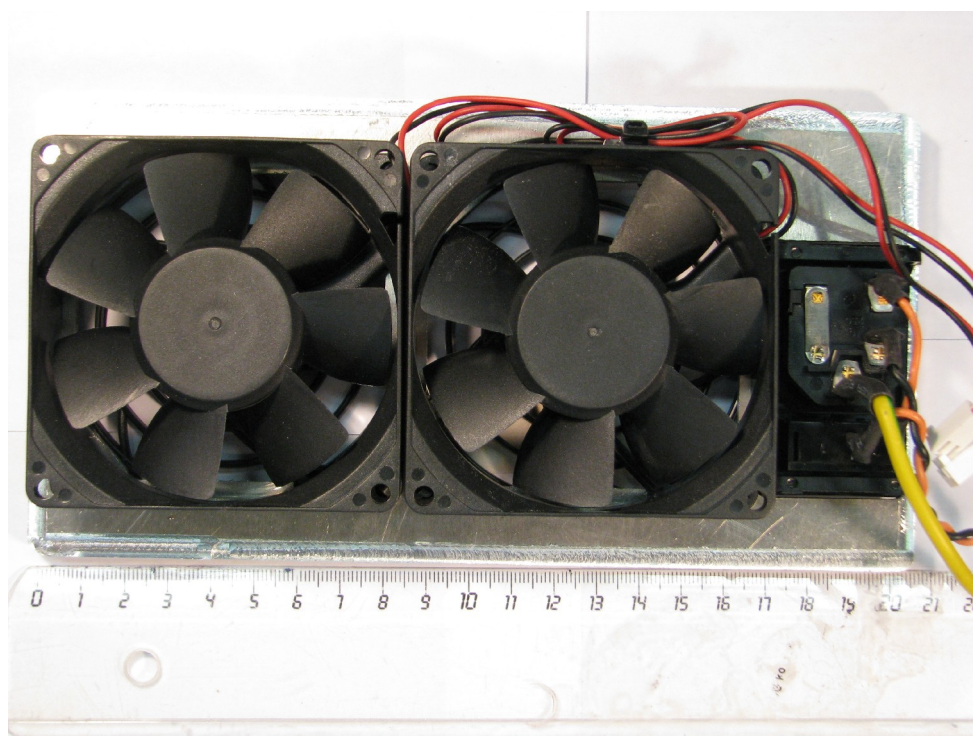


Valokuva 3: Piirilevy alapuolelta.

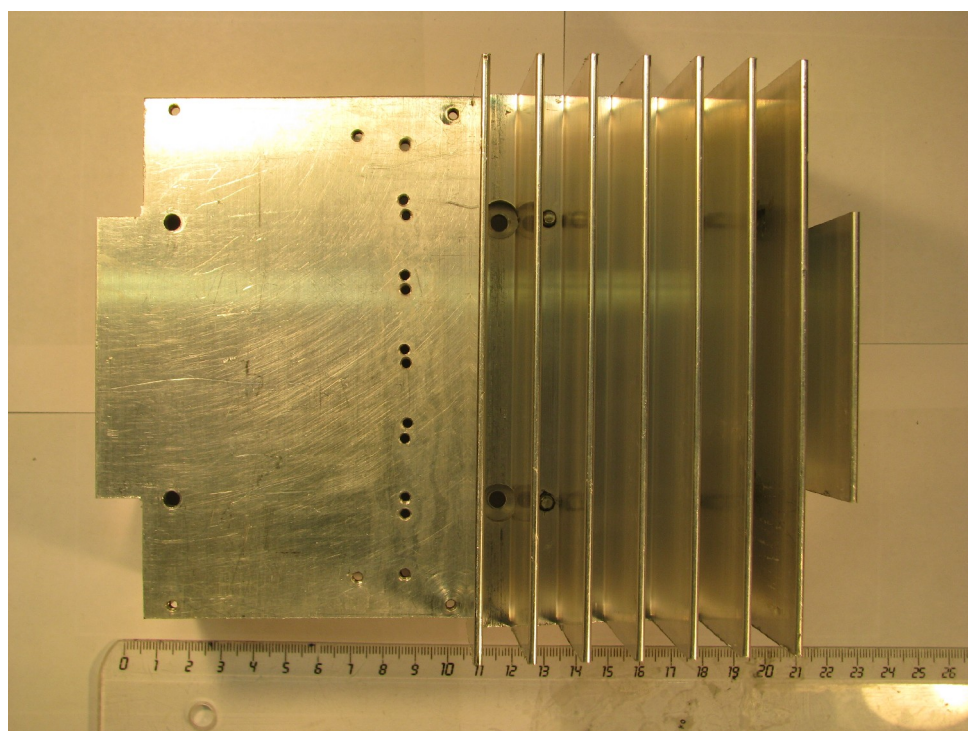


Valokuva 4: Piirilevy yläpuolelta.

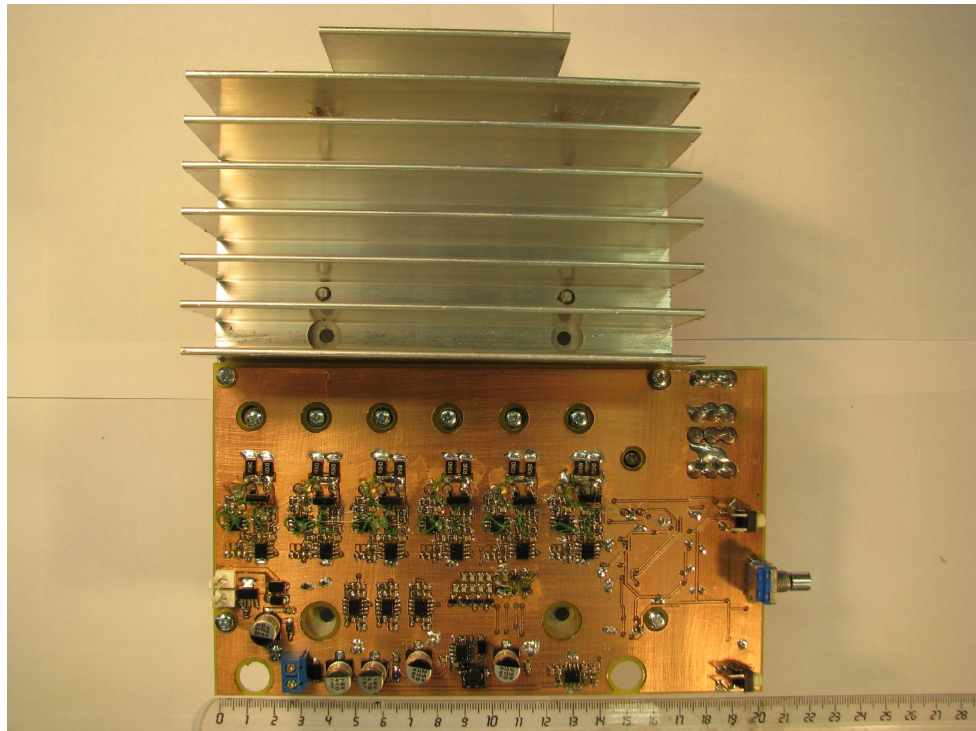




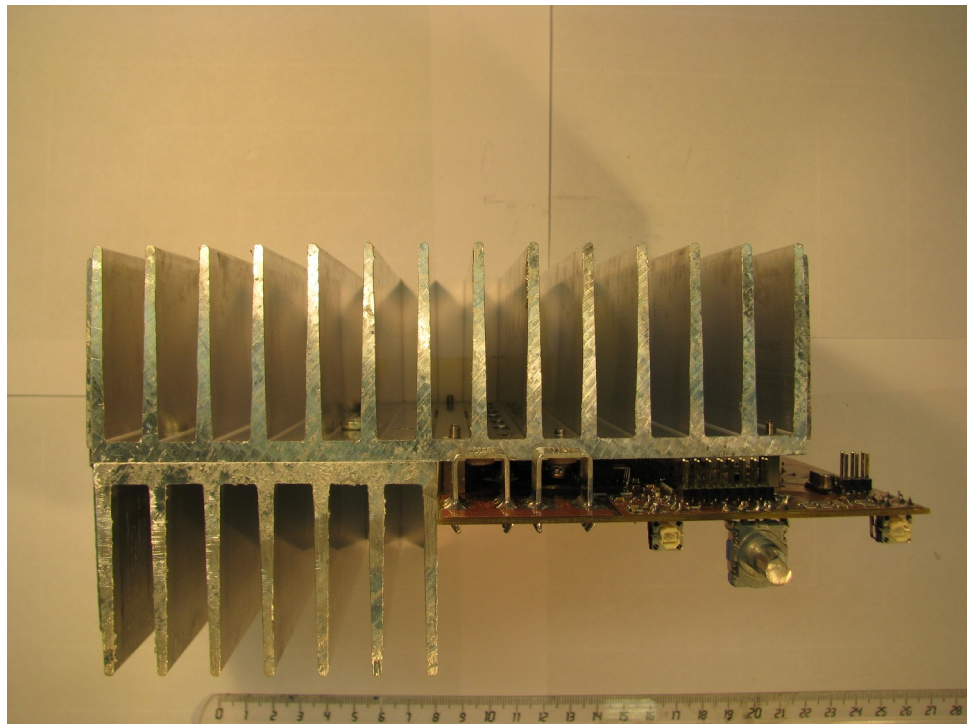
Valokuva 5: Takapaneeli sisältä, puhaltimet ja liittimet asennettu.



Valokuva 6: Jäähdytyslementti alta, palat yhdistetty.

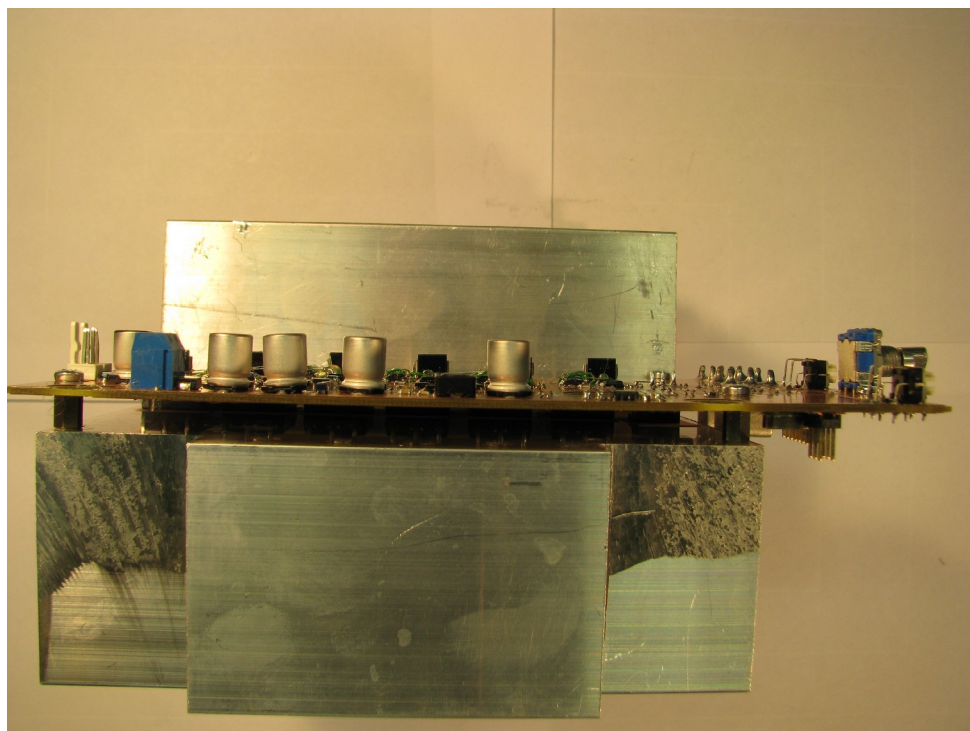


Valokuva 7: Piirilevy asennettuna jäähdytyslementtiin.



Valokuva 8: Jäähdytyslementti ja piirilevy edestä.

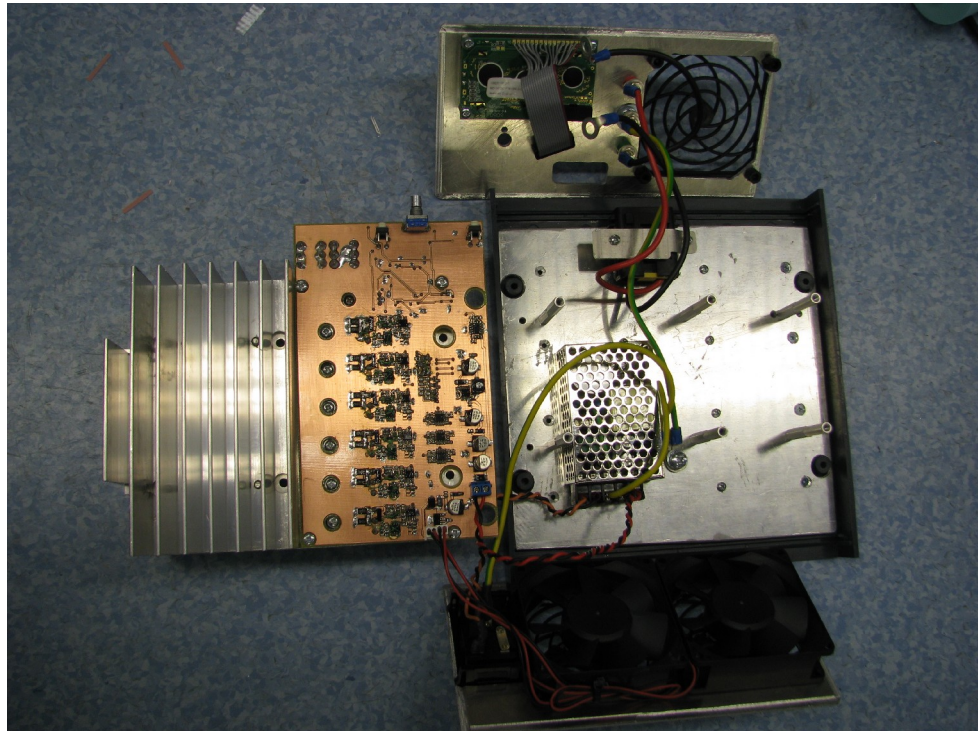




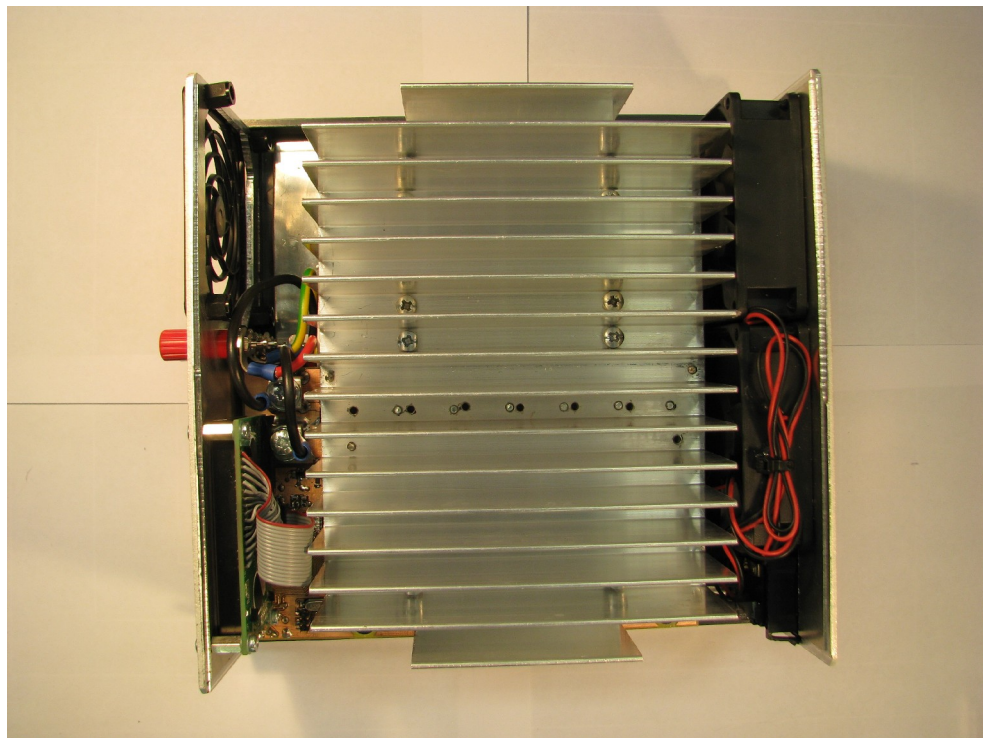
*Valokuva 9: Piirilevy ja jäähdytyslementti sivulta.*



*Valokuva 10: Kotelon sisusta ylhäältä, osittain kalustettu.*

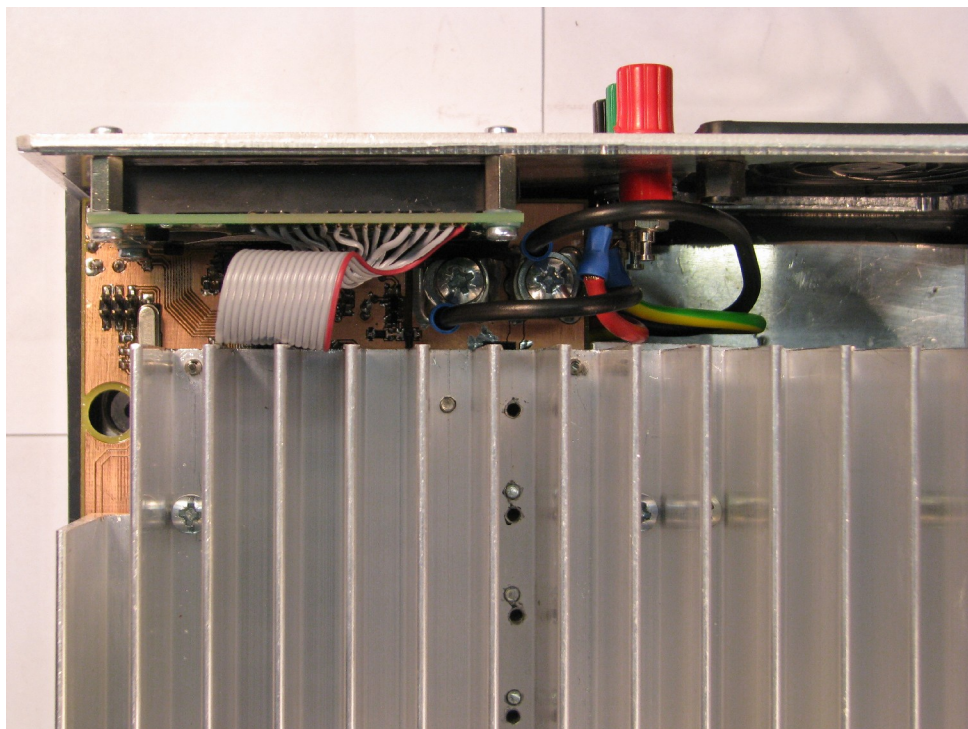


*Valokuva 11: Paneelit ja jäähdytyslementti odottavat kokoamista.*

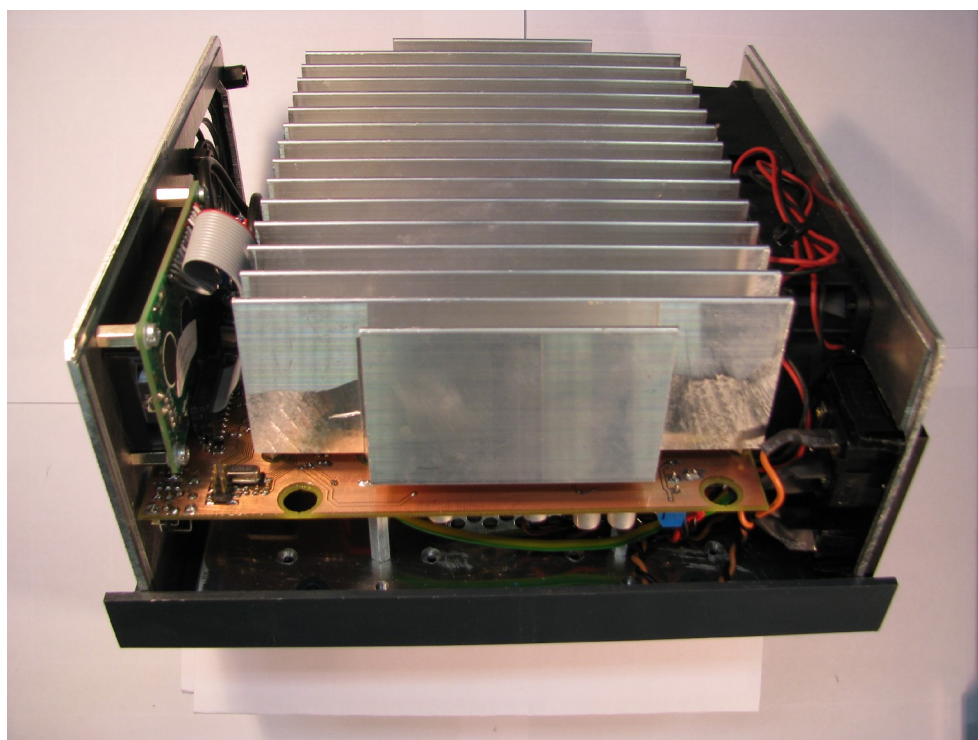


*Valokuva 12: Paneelit ja jäähdytyslementti paikoillaan, kuva ylhäältä.*





*Valokuva 13: Osien sovittelu etupaneelin takana.*



*Valokuva 14: Laite sivulta, kuoret edelleen auki.*



Valokuva 15: Laite koottuna, tuki taivutettu alas.

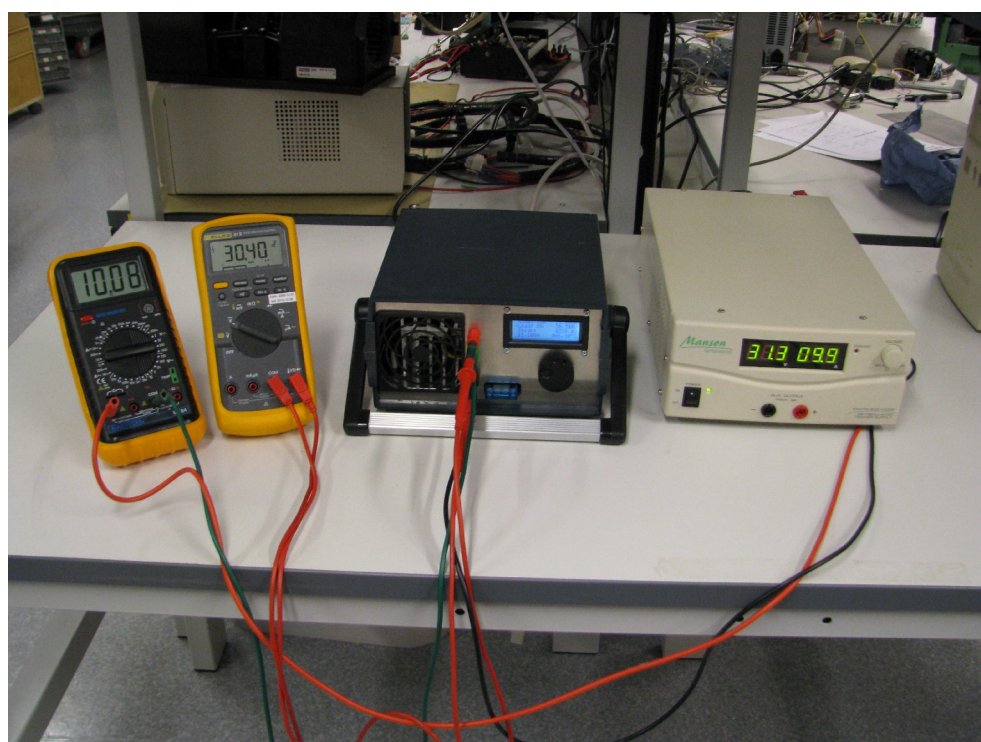


Valokuva 16: Laite edestä.

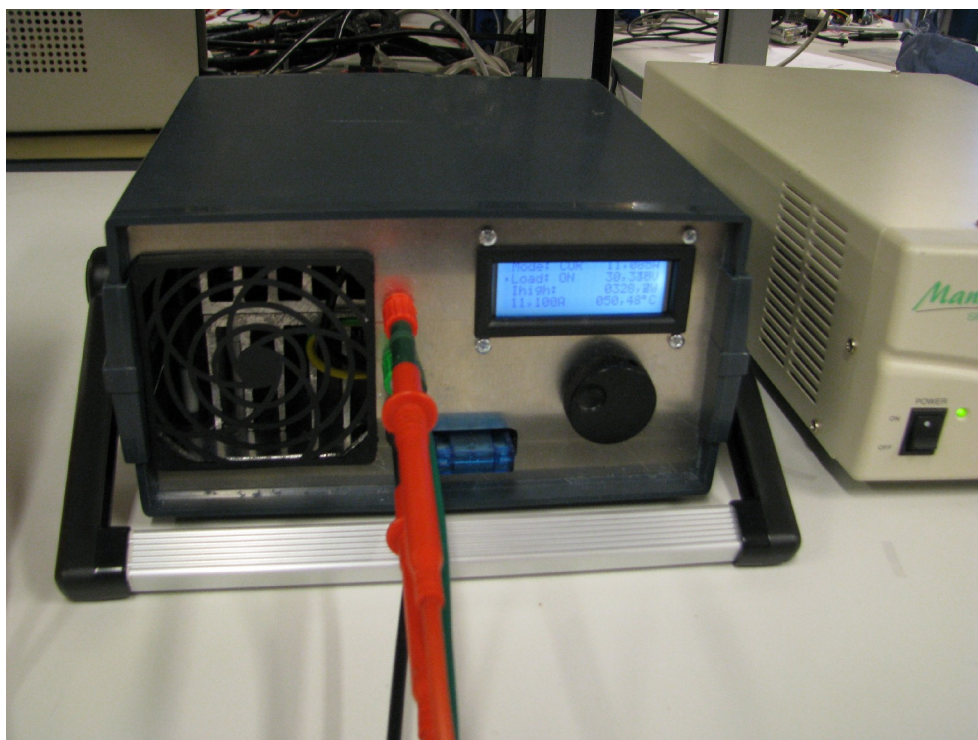




Valokuva 17: Käyttöliittymä



Valokuva 18: Testausjärjestely



Valokuva 19: 300W kuormitustesti.